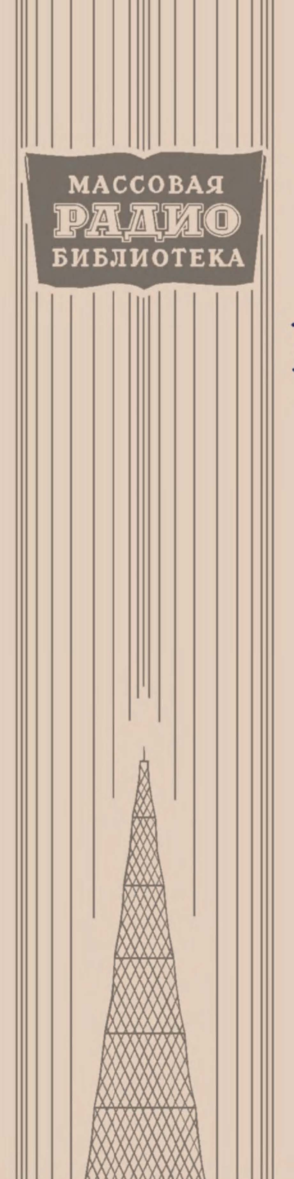
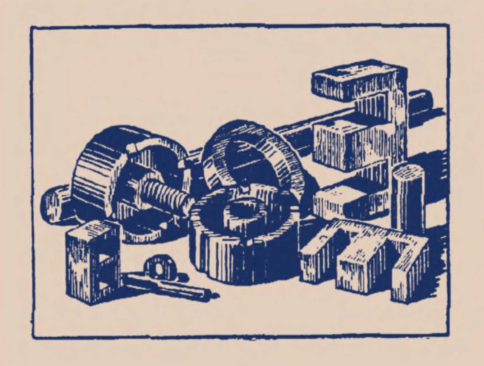


А. Ф. СЕНЧЕНКОВ и Л. Г. ФУНШТЕЙН

ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРИТОВ В РАДИОАППАРАТУРЕ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1956

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 250

А. Ф. СЕНЧЕНКОВ и Л. Г. ФУНШТЕЙН

ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРИТОВ В РАДИОАППАРАТУРЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1956 ЛЕНИНГРАД

В брошюре рассматриваются свойства ферритов и их применение в радиоаппаратуре в качестве сердечников катушек индуктивности, дросселей, трансформаторов, магнитных антенн, вариометров.

Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

Авторы *Сенченков Александр Филиппович, Фунштейн Лидия Григорьевна*

ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРРИТОВ В РАДИОАППАРАТУРЕ

Редактор *Ф. И. Тарасов* Техн. редактор *Г. Е. Ларионов*

Сдано в пр-во 14/IV 1956 г. Подписано к печати 3/VII 1956 г.
Бумага 84×108[1]/32 4,1 п. л. Уч.-изд. л. 4,8
Г-06660 Тираж 25 000 Цена 1 р. 95 к. Зак. 1210

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРИТОВ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФЕРРИТОВ

До последнего времени в качестве сердечников трансформаторов и катушек индуктивности использовали только две группы магнитных материалов:

а) металлические магнитные материалы с высокой магнитной проницаемостью, обычно применяемые при низких частотах;

б) магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа и альсифера с невысоким значением проницаемости и малыми потерями на высоких частотах.

Металлические магнитные материалы (различные сорта трансформаторной стали, пермаллой и т. п.) обладают низким значением удельного электрического сопротивления (порядка 0,00001—0,0001 *ом · см*). Поэтому они не могут быть применены на высоких частотах, так как возникающие в них вихревые токи вызывают значительные потери энергии (потери на вихревые токи возрастают пропорционально квадрату частоты).

На высоких частотах используются магнитодиэлектрики, представляющие собой магнитный порошок, частицы которого изолированы друг от друга диэлектриком. Они имеют высокое удельное сопротивление (порядка 0,1—100 *ом · см*).

Существенным недостатком магнитодиэлектриков является их небольшая магнитная проницаемость (порядка 10—60 *гс/эрс*). Поэтому за последние десятилетия было проделано много исследований с целью выявления магнитных материалов с высокой проницаемостью и высоким удельным сопротивлением и, следовательно, с малыми потерями на вихревые токи.

В природе существует неметаллический магнитный материал — магнетит (Fe_3O_4), обладающий высоким удельным сопротивлением (в 100 000 раз большим, чем у железа). Этот материал в свое время применялся для сердечников катушек индуктивности. Но вследствие недостаточной стабильности величины проницаемости во времени магнетит был вытеснен более стабильными магнитодиэлектриками на основе карбонильного железа и альсифера.

В процессе изыскания магнитного материала с высокой проницаемостью и малыми потерями на высоких частотах выяснилось, что при замене в магнетите одного из трех атомов железа атомом никеля, марганца, магния, меди или другим двухвалентным металлом (за исключением цинка и кадмия) можно получить магнитные неметаллические материалы с ценными для радиотехнических целей физическими свойствами. Эта группа материалов носит название ферритов (они называются также оксиферами, феррокскубами, феррокерамикой) Таким образом, ферритами называют соединения типа $MOFe_2O_3$, где М — символ двухвалентного металла.

Установлено, что наилучшими свойствами обладают сложные ферриты, состоящие из ферромагнитных ферритов никеля, марганца, магния или меди и неферромагнитных ферритов цинка и кадмия Наибольшее распространение получили никель-цинковые и марганец-цинковые ферриты.

Технология изготовления ферритов аналогична технологии изготовления керамики.

Смесь окислов двухвалентных металлов в виде порошка определенного химического состава тщательно перемешивается. Детали прессуются из указанной смеси окислов в стальных прессформах при удельном давлении 1—2 *т/см*^{2} или формуются протяжкой. Для облегчения прессования деталей порошок увлажняется водой или смешивается с органическим связующим веществом (3—5% по весу). Часто в качестве такого связующего материала используется парафин, который тщательно перемешивается с порошком при температуре 70—80°. Это органическая связка из отпрессованных деталей выжигается постепенным нагревом до температуры 300°.

После прессовки детали подвергаются спеканию при температуре 1 100—1 400°, при которой и происходит образование ферритов. В процессе спекания происходит усадка в пределах от 10 до 20%.

Основные свойства ферритов находятся в большой зависимости от химического состава, размера частиц окислов, тщательности их перемешивания, температуры и продолжительности спекания спрессованных деталей.

Ферриты имеют мелкозернистую кристаллическую структуру. Механические свойства их близки к механическим свойствам керамических изделий. Детали из феррита обладают значительной твердостью, подвергаются обработке только с помощью абразивов и алмазным инструментом, хорошо шлифуются с помощью карборундового порошка.

Ферриты имеют проницаемость от 10 до 2 000 *гс/эрс*. Удельный вес различных ферритов колеблется от 3 до 5 *г/см*^{3}, причем наибольший удельный вес имеют ферриты с высоким значением проницаемости. Удельная теплоемкость ферритов около 0,17 *кал/*°C, теплопроводность — 10^{-4} *кал/см сек*°C, коэффициент линейного расширения равен 10^{-5} 1/°C, удельное сопротивление постоянному току лежит в пределах от 10 до 10^7 *ом·см* (в 10^6 — 10^{11} раз выше, чем для типовых металлических низкокоэрцитивных материалов).

2. ПАРАМЕТРЫ И СВОЙСТВА ФЕРРИТОВ В ПОСТОЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Поле, создаваемое постоянным магнитом или электрическим током, характеризуется напряженностью H и выражается в эрстедах (*эрс*). Под напряженностью магнитного поля понимают число силовых линий, приходящихся на 1 *см*^{2} поперечного сечения поля.

Общее число магнитных силовых линий, создаваемых постоянным магнитом или электрическим током, называют магнитным потоком Φ.

При внесении в магнитное поле тела (например, куска стали) оно намагничивается, в нем создается определенный магнитный поток. Плотность магнитного потока, т. е. поток, проходящий через сечение в 1 *см*^{2} тела, называют магнитной индукцией B. Магнитная индукция измеряется в гауссах (*гс*). Если площадь поперечного сечения тела равна S, то магнитный поток $\Phi = BS$.

Отношение магнитной индукции B к напряженности

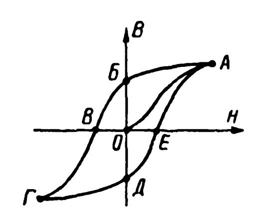
магнитного поля H называют **магнитной проницаемостью** μ вещества, из которого сделано тело:

$$\mu = \frac{B}{H}. \qquad (1)$$

Для вакуума и с известной степенью приближения для воздуха магнитная индукция численно равна напряженности магнитного поля и, следовательно, $\mu = 1$.

По величине магнитной проницаемости все физические тела подразделяются на **диамагнитные** и **парамагнитные**, причем частным случаем последних являются тела ферромагнитные. Магнитная проницаемость парамагнитных тел больше, а диамагнитных меньше единицы, но для тех и других тел (за исключением ферромагнитных) величина проницаемости близка к единице. Величина магнитной проницаемости для ферромагнитных тел во много раз больше, чем для парамагнитных.

Существенная разница между ферромагнитными и другими телами заключается еще в том, что проницаемость последних при изменении напряженности намагничивающего поля почти постоянная, в то время как проницаемость ферромагнитных тел есть величина переменная, сильно меняющаяся от степени намагничивания. Если ферромагнитное тело поместить в магнитное поле, напряженность которого меняется, то индукция в теле будет изменяться по кривой OA, называемой основной кривой намагничивания (фиг. 1). Из этой кривой видно, что индукция в ферромагнитном материале не пропорциональна напряженности намагничивающего поля. В начале кривая имеет сравнительно слабый подъем, затем наблюдается резкое возрастание индукции с ростом напряженности магнитного поля, далее индукция растет все медленнее и медленнее. При сильных же полях, когда наступает насыщение материала, приращение индукции будет происходить только за счет приращения поля, и кривая перейдет в прямую линию, наклоненную к горизонтальной оси.



Фиг. 1. Основная кривая намагничивания и петля гистерезиса ферромагнитного тела.

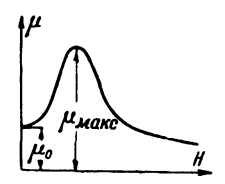
Индукция, соответствующая насыщению материала, называется **индукцией насыщения** B. Если начать уменьшать напряженность намагничивающего поля, то магнитная индукция в теле будет уменьшаться, но не по кри-

вой *АО*, а значительно медленнее, по кривой *АБ*. При циклическом изменении напряженности поля индукция будет изменяться по кривой, называемой **петлей гистерезиса** (*АБВГДЕА*).

Значение индукции, остающейся в материале после снятия внешнего магнитного поля ($H = 0$), называется **остаточной индукцией** B_r. Напряженность магнитного поля, необходимая для полного размагничивания материала, называется **коэрцитивной силой** H_c.

Явление, при котором индукция в теле во время перемагничивания как бы отстает от напряженности поля, называется **гистерезисом**. Таким образом, вследствие явления гистерезиса энергия, затрачиваемая на намагничивание ферромагнитного тела, оказывается большей, чем отдаваемая данным телом при размагничивании. Разница в этих количествах энергии идет на нагревание ферромагнитного тела и представляет собой потери на гистерезис. Площадь гистерезисной петли пропорциональна потерям на гистерезис.

По основной кривой намагничивания согласно формуле (1) можно построить график зависимости проницаемости μ от напряженности намагничивающего поля H. Как видно из фиг. 2, кривая магнитной проницаемости в точке $H=0$ отсекает на вертикальной оси графика определенный отрезок, который является функцией материала и называется **начальной магнитной проницаемостью** μ_0.



Фиг. 2. Зависимость проницаемости ферромагнитного тела от напряженности постоянного поля.

Общий характер зависимости проницаемости от напряженности поля для различных ферромагнитных тел один и тот же, но наибольшее значение проницаемости, называемое **максимальной магнитной проницаемостью** $\mu_{макс}$, может быть различным для различных ферромагнитных тел и соответствовать различным напряженностям намагничивающего поля.

Основные параметры ферритов в постоянном поле приведены в табл. 1.

За индукцию насыщения принята индукция при напряженности поля в 100 *эрс*. Из данных табл. 1 видно, что ферриты относятся к так называемым магнитно-мягким материалам (материалам с малой коэрцитивной силой) с низкой индукцией насыщения, лежащей в пределах 1 500—5 000 *гс*.

Таблица 1

Параметры ферритов в постоянных магнитных полях

Наименование ферритов	μ_0, гс/эрс	$\mu_{макс}$, гс/эрс	H (соответствующее $\mu_{макс}$), эрс	$H = 100$ эрс		
				B_s, гс	B_r, гс	H_c, эрс
Оксифер-2000	1 800—2 400	6 000—7 000	0,15	2 500	1 200	0,1
Оксифер-1000	800—1 200	3 000—3 500	0,4	3 200	1 500	0,25
Оксифер-600	550—600	1 200—1 400	0,7	3 100	1 400	0,4
Оксифер-500	500—550	1 000—1 200	0,9	2 800	1 300	0,5
Оксифер-400	360—440	750—850	1,0	2 300	1 200	0,8
Оксифер-200	180—220	280—330	2,0	1 800	1 000	1,5
Оксифер-И-4	180—220	750—850	1,5	4 200	2 000	0,8
Оксифер-И-5	135—165	650—750	2,5	4 800	2 250	1,2
Оксифер-РЧ-15	14—16	35—45	30	1 850	1 000	15
Оксифер-РЧ-10	9—11	14—17	40	1 400	400	24

3. ПАРАМЕТРЫ И СВОЙСТВА ФЕРРИТОВ В ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Основные параметры. Одним из основных параметров в переменных магнитных полях, характеризующим магнитный материал для сердечников катушек, является динамическая магнитная проницаемость $\mu_\sim$, которая представляет собой отношение переменной составляющей индукции к переменной составляющей напряженности магнитного поля. Проницаемость $\mu_\sim$ при увеличении напряженности переменного магнитного поля вначале возрастает, а затем по мере приближения к области насыщения данного магнитного материала начинает падать.

Магнитная проницаемость тороидального сердечника с однослойной обмоткой, равномерно нанесенной для создания однородного магнитного поля, определяется формулой

$$\mu_\sim = \frac{2{,}5Ld\cdot 10^8}{w^2S}, \qquad (2)$$

где L — индуктивность катушки, *гн*;
d — средний диаметр сердечника, *см*;
w — число витков намотки;
S — площадь поперечного сечения сердечника, *см²*.

Динамическая магнитная проницаемость, измеренная в слабых переменных полях и на низких частотах, близка к начальной магнитной проницаемости, измеренной на постоянном токе.

Другим важным параметром, характеризующим магнитный материал, является тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ или добротность материала $Q_м$. Тангенс угла потерь (представляющий собой отношение сопротивления потерь в сердечнике к реактивному сопротивлению)

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{r_c}{2\pi f L}, \quad (3)$$

где f — частота, *гц*;

r_c — общее сопротивление потерь в тороидальном сердечнике на частоте f и поле $H_\sim$, *ом*;

L — индуктивность катушки с сердечником на частоте f и поле $H_\sim$, *гн*.

Добротность материала является обратной величиной тангенса угла потерь.

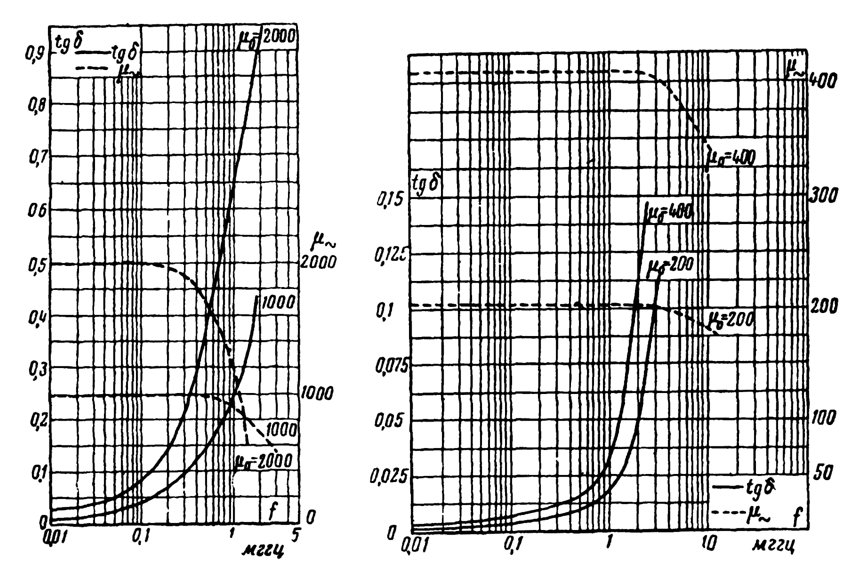
Сопротивление потерь в сердечнике r_c для низких частот вычисляется как разность сопротивлений потерь катушки с сердечником и без сердечника, причем сопротивление катушки с сердечником измеряется при переменном, а сопротивление катушки без сердечника при постоянном токе. Если измерения производятся на высоких частотах (выше десятков *кгц*), необходимо учитывать потери на поверхностный эффект провода.

Потери в магнитных материалах состоят из потерь на вихревые токи, потерь на гистерезис и потерь на последействие. Потери на последействие обусловлены некоторыми остаточными изменениями в магнитном материале, происходящими под воздействием переменного магнитного поля, и зависят от внутренней структуры магнитного материала. Общий тангенс угла потерь в сердечнике равен сумме тангенсов углов потерь на вихревые токи $\operatorname{tg}\delta_в$, гистерезис $\operatorname{tg}\delta_г$ и последействие $\operatorname{tg}\delta_п$.

У листовых магнитных материалов в слабых полях основным видом потерь являются потери на вихревые токи, а потери на гистерезис и последействие незначительны по сравнению с потерями на вихревые токи. Так как ферриты обладают высоким электрическим сопротивлением, потери на вихревые токи у них малы. Основными потерями в ферритах являются потери на гистерезис и последействие. При использовании ферритов в слабых переменных полях потери на гистерезис невелики, и бóльшую часть из общих потерь составляют потери на последействие. Так как для ферритов довольно сложно производить разделение потерь, то обычно

потери характеризуют общим тангенсом угла потерь, измеренным при определеной частоте f и определенной напряженности переменного поля $H_{\sim}$ или приведенным тангенсом угла потерь, равным $\frac{\operatorname{tg}\delta}{\mu}$.

Зависимость проницаемости и тангенса угла потерь от частоты. Такая зависимость для различных типов ферритов в слабых полях показана на графиках фиг. 3 и 4. Из этих



Фиг. 3. Зависимость динамической проницаемости и тангенса угла потерь от частоты ($H_{\sim} \approx 0$) для оксифера-1000 и оксифера-2000.

Фиг. 4. Зависимость динамической проницаемости и тангенса угла потерь от частоты ($H_{\sim} \approx 0$) для оксифера-400 и оксифера-200.

графиков следует, что чем выше проницаемость материала, тем больше ее зависимость от частоты. Так, например, для феррита промышленной марки оксифер-200 проницаемость не меняется до частоты 3 *мггц,* а для феррита с более высокой проницаемостью (оксифер-2000) она сохраняется постоянной только до частоты 100 *кгц.* Сплошными линиями на фиг. 3 и 4 показана зависимость величины тангенса угла потерь ферритов от частоты в слабых полях. Из графиков следует, что чем меньше магнитная проницаемость феррита, тем меньше для него величина тангенса угла потерь и тем меньше эта величина возрастает с увеличением частоты.

Таблица 2

Зависимость проницаемости от частоты для ферритов и листовых магнитных материалов

Наименование материала	Динамическая проницаемость μ, *гс/эрс*	
	при f = 1 *кгц*	при f = 100 *кгц*
Оксифер-2000	2 000	2 000
Оксифер-1000	1 000	1 000
Оксифер-400	400	400
Сплав 50НХС-0,1	2 000	500
Сплав 50НХС-0,05	1 600	1 200
Сплав ХВП-0,08	850	250

Из приведенных в табл. 2 сравнительных данных ферритов с высокой проницаемостью и листовых магнитных материалов видно, что проницаемость ферритов при изменении частоты от 1 до 100 *кгц* не изменяется, а у листовых магнитных материалов наблюдается ее резкое изменение.

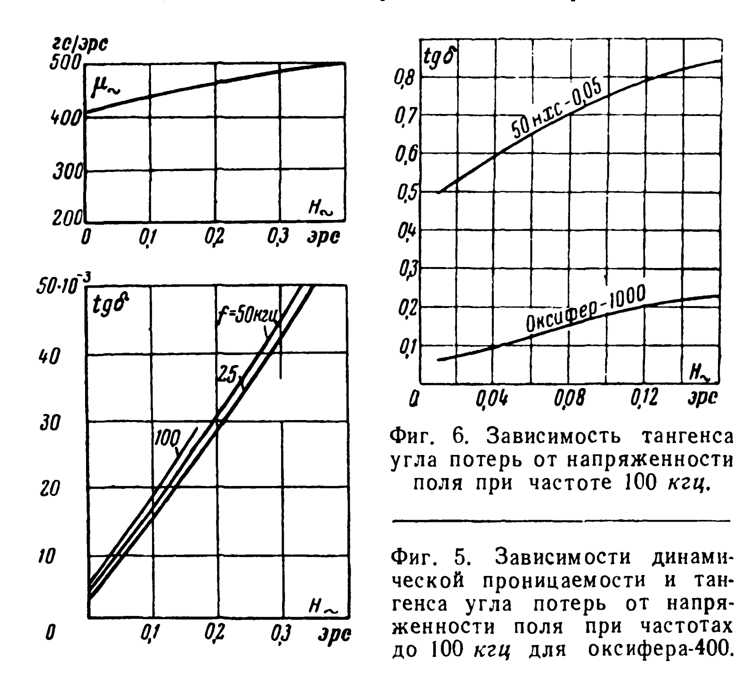
Сравнение основных параметров ферритов низкой проницаемости с магнитодиэлектриками на основе карбонильного железа и альсифера такой же проницаемости дано в табл 3. Указанные здесь ферриты при использовании их в слабых полях на частотах порядка десятков мегагерц обладают рядом преимуществ по сравнению с типовыми магнитодиэлектриками. Они имеют меньший общий тангенс угла потерь, чем карбонильное железо такой же проницаемости, а следовательно, и применение их в области частот порядка 10—50 *мггц* дает возможность получения катушек индуктивности с большей добротностью.

Таблица 3

Сравнительные параметры высокочастотных ферритов и типовых магнитодиэлектриков

Наименование материала	Начальная магнитная проницаемость, *гс/эрс*	Общий тангенс угла потерь		Коэффициент потерь на гистерезис H = 1 *эрс*
		при f=20 *мггц*	при f=50 *мггц*	
Оксифер-РЧ-10	10	0,0077	0,014	0,0028
Оксифер-РЧ-15	15	0,009	0,025	0,006
Карбонильное железо .	10	0,015	0,022	0,0001
Альсифер	19	0,1	—	0,0012

Зависимость проницаемости и тангенса угла потерь от напряженности переменного поля. У ферритов даже в слабых полях наблюдается изменение проницаемости от напряженности переменного поля. На фиг. 5 показана зависимость проницаемости и тангенса угла потерь для оксифера-400 от напряженности переменного поля $H_{\sim}$. Из данных фиг. 5 видно, что с увеличением напряженности переменного поля



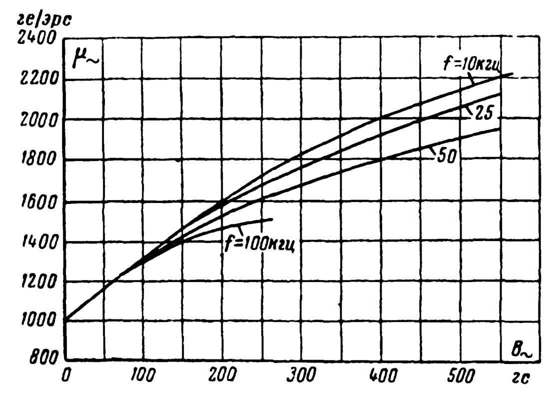
Фиг. 6. Зависимость тангенса угла потерь от напряженности поля при частоте 100 *кгц*.

Фиг. 5. Зависимости динамической проницаемости и тангенса угла потерь от напряженности поля при частотах до 100 *кгц* для оксифера-400.

повышаются как проницаемость, так и тангенс угла потерь. По величина тангенса угла потерь и ее изменение с напряженностью поля у ферритов значительно меньше, чем у листовых магнитных материалов.

Для сравнения на фиг. 6 показана зависимость тангенса угла потерь от напряженности поля для оксифера-1000 и сплава 50НХС при толщине листа 0,05 *мм*, имеющих одинаковые значения проницаемости на частоте 100 *кгц*. Зависимость проницаемости от индукции переменного магнитного поля показана на фиг. 7. Здесь видно, что проницаемость при малых индукциях не зависит от частоты, при больших же индукциях проницаемость в зависимости от индукции изменяется на разных частотах по-разному.

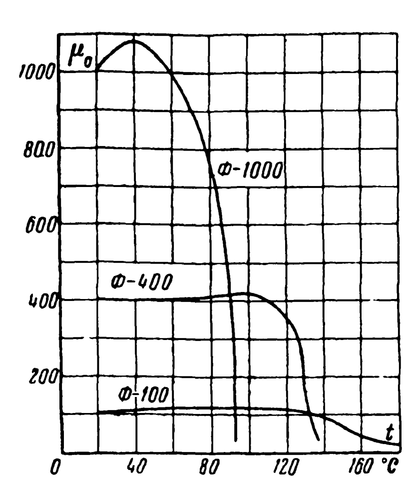
В сильных полях у ферритов наблюдается резкое возрастание тангенса угла потерь. Объясняется это тем, что ферриты при сильных полях имеют значительные потери на гистерезис. Как известно, с потерями на гистерезис связаны



Фиг. 7. Зависимость динамической проницаемости оксифера-1000 от индукции при различных частотах.

нелинейные искажения, которые, следовательно, также возрастают в сильных полях. Все это несколько ограничивает использование ферритов.

Зависимость проницаемости и тангенса угла потерь от температуры. Температура, при которой происходит переход из ферромагнитного состояния в парамагнитное (материал теряет свои ферромагнитные свойства), называется точкой Кюри магнитных материалов. С ростом температуры магнитная проницаемость ферритов изменяется. При приближении к точке Кюри магнитная проницаемость ферритов в слабых полях возрастает, достигает максимума и в непосредственной близости к точке Кюри резко уменьшается.



Фиг. 8. Зависимость начальной проницаемости ферритов от температуры.

На фиг. 8 показана зависимость магнитной проницаемости от температуры для нескольких типов ферритов. Чем выше начальная проницаемость ферритов, тем сильней она изменяется при изменении температуры. Точкой Кюри определяется максимально допустимая рабочая температура (максимально допустимой рабочей температурой условились называть температуру, при которой начальная магнитная проницаемость изменяется на 20% от своего первоначального значения при температуре 20° С).

Обычно температурную стабильность магнитных материалов характеризуют температурным коэффициентом магнитной проницаемости

$$TK\mu = \frac{\Delta\mu}{\mu\Delta t}, \qquad (4)$$

где $\Delta\mu$ — изменение проницаемости при изменении температуры на $\Delta t°$.

Часто также пользуются и приведенным температурным коэффициентом проницаемости

$$\frac{TK\mu}{\mu} = \frac{\Delta\mu}{\mu^2\Delta t}. \qquad (5)$$

В табл. 4 приведены предельно допустимая рабочая температура и температурный коэффициент начальной проницаемости типовых ферритов.

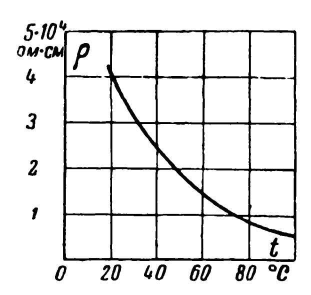
Таблица 4

Температурный коэффициент проницаемости ферритов

Производственная марка феррита	μ_0, *гс/эрс*	Предельно допустимая рабочая температура, °С	$TK\,\mu_0 \cdot 10^6$
Оксифер-2000	2 000	70	6 000
Оксифер-1000	1 000	110	4 000
Оксифер-600	600	120	3 500
Оксифер-400	400	120	2 000
Оксифер-200	200	120	800
Оксифер-И-4	200	250	3 500
Оксифер-И-5	150	360	3 500
Оксифер-РЧ-15	15	400	500
Оксифер-РЧ-10	10	400	200
Ф-2000	2 000	90	7 000
$Ф_1$-1000	1 000	100	5 000
Ф-600	600	130	6 000
Ф-400	400	130	3 000
$Ф_2$-100	100	450	2 500
Ф-40	40	390	1 000
Ф-25	25	500	1 300
Ф-15	15	500	900

На фиг. 9 показана зависимость удельного электрического сопротивления феррита с начальной магнитной проницаемостью 2 000 *гс/эрс* от температуры. С ростом температуры удельное электрическое сопротивление ферритов уменьшается, в связи с чем увеличиваются потери на вихревые токи. Следовательно, добротность катушки с ферритовым сердечником при возрастании температуры будет уменьшаться.

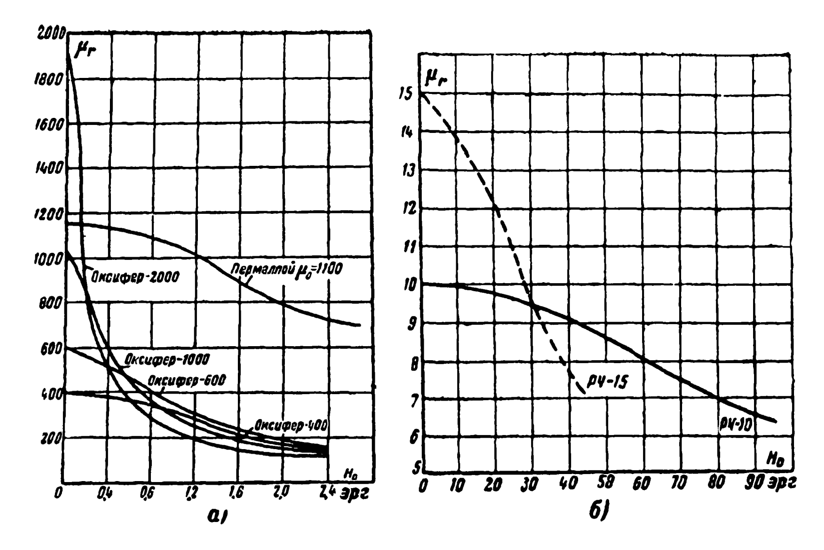
Обратимая магнитная проницаемость и ее зависимость от температуры. Реверсивная, или обратимая, проницаемость — это проницаемость в переменном поле при наличии постоянного поля, напряженность которого значительно превышает напряженность переменного поля. Если через катушку с ферромагнитным сердечником одновременно протекают переменный и постоянный токи, то для расчета величины ее индуктивности необходимо знать обратимую магнитную проницаемость сердечника μ.



Фиг. 9. Зависимость удельного электрического сопротивления феррита с $\mu_0 = 2\,000$ *гс/эрс* от температуры.

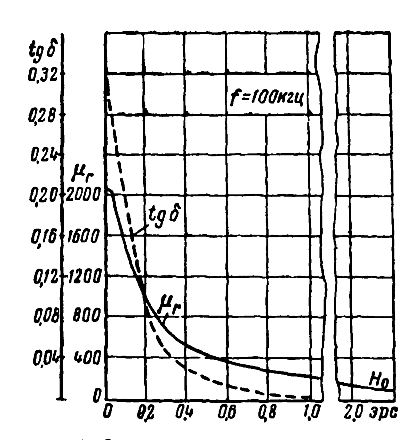
Характерной особенностью ферритов является резкая зависимость их обратимой проницаемости от напряженности постоянного подмагничивающего поля (фиг. 10). Чем выше начальная магнитная проницаемость феррита, тем наиболее резко это проявляется. Так, например, изменение обратимой магнитной проницаемости в 10 раз у оксифера-600 происходит при напряженности поля 5 *эрс*, у оксифера-400 при 12 *эрс*, оксифера-200 при 80 *эрс*. Кривые зависимости обратимой магнитной проницаемости от постоянного поля для ферритов одинаковы в широком диапазоне частот. Для листовых же низкокоэрцитивных материалов, динамическая проницаемость которых с частотой резко падает, характер такой зависимости при разных частотах различен.

Обратимая магнитная проницаемость ферритов, применяемых на высоких частотах, также резко изменяется в зависимости от напряженности постоянного поля даже при частотах порядка десятков мегагерц в отличие от карбонильного железа, обратимая проницаемость которого почти не изменяется даже при сильных полях. Резкое влияние посто-



Фиг. 10. Зависимость обратимой магнитной проницаемости ферритов и пермаллоя от напряженности постоянного магнитного поля.

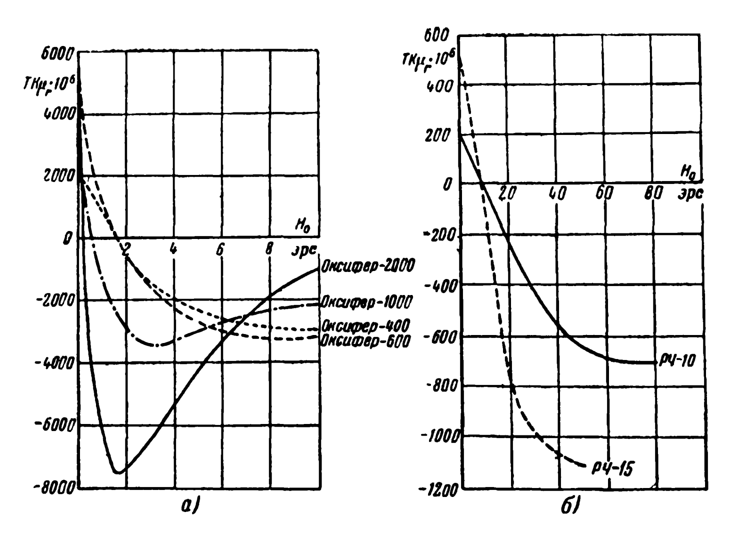
а — для ферритов с высокой проницаемостью и пермаллоя (f = 100 *кгц*, $H_{\sim}$ = 10 *мэрс*); *б* — для высокочастотных ферритов: оксифер-РЧ-10 и оксифер-РЧ-15.



Фиг. 11. Зависимость обратимой магнитной проницаемости и тангенса угла потерь у оксифера-2000 от напряженности постоянного магнитного поля H_0 при $f = 100$ *кгц* и $H_{\sim} \approx 0$.

янного поля на обратимую магнитную проницаемость открывает совершенно новую область использования ферритов на высоких частотах по сравнению с магнитодиэлектриками (дистанционная настройка, магнитные усилители и т. д.).

Потери в феррите при наличии постоянного поля уменьшаются: чем больше величина подмагничивающего поля, тем меньше потери. На фиг. 11 показана зависимость обратимой проницаемости и тангенса угла потерь у оксифера-2000 на частоте



Фиг. 12. Зависимость температурного коэффициента обратимой проницаемости от напряженности постоянного магнитного поля для различных марок ферритов.

а — с высокой проницаемостью; *б* — с малой проницаемостью.

100 *кгц* от величины напряженности постоянного поля. Уже при поле в 0,2 *эрс* тангенс угла потерь у оксифера-2000 уменьшается в 4 раза, обратимая проницаемость при этом уменьшается приблизительно в 2,5 раза.

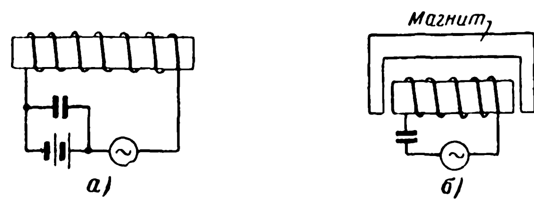
Зависимость температурного коэффициента обратимой магнитной проницаемости $TK\mu_r$ от напряженности подмагничивающего поля H_0 для типовых ферритов показана на фиг. 12. Из приведенных здесь кривых видно, что $TK\mu_r$ ферритов при малых H_0 имеет положительное значение. При увеличении же H_0 он проходит через нулевое значение и меняет свой знак на отрицательный. При определенном значении поля H_0 температурный коэффициент обратимой проницаемости имеет максимальное отрицательное значение, при дальнейшем увеличении поля величина его падает.

Как видно из приведенных кривых, для каждого типа ферритов имеется определенное значение поля, при котором $TK\mu_r = 0$. Такая зависимость обратимой магнитной проницаемости от температуры не является характерной только для ферритов, она присуща всем ферромагнитным материалам, но у ферритов эта зависимость наиболее рез-

ко выражена, так как их точка Кюри (60—200° С) лежит в области температур ближе к рабочей, чем у большинства ферромагнитных материалов (600—800° С).

4. МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРИТОВ

Как и все ферромагнитные тела, ферриты обладают магнитострикцией. Если ферромагнитное тело поместить в магнитное поле, то его геометрические размеры и объем изменятся. С другой стороны, всякое деформирование ферромагнитного тела (растяжение, сжатие, изгибание, скручивание) приводит к изменению его магнитных свойств, в частности, проницаемости μ. Эти явления носят название прямого и обратного эффекта магнитострикции. Знак магнитострикции, т. е. увеличение или уменьшение размеров и величина изменения их, определяется материалом, величиной магнитного поля и температурой.



Фиг. 13. Магнитострикционные резонаторы.
а — с постоянным магнитным полем за счет тока обмотки; *б* — с постоянным магнитом.

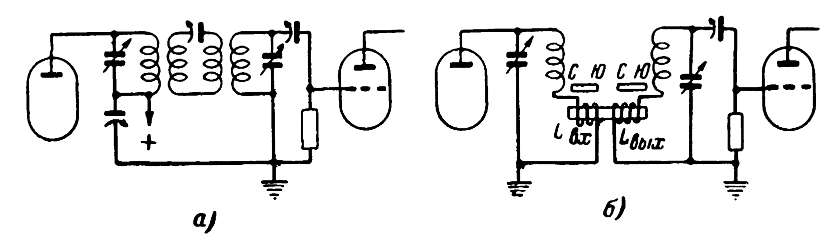
Магнитострикция у всех ферритов при комнатной температуре имеет отрицательный знак, за исключением феррита железа Fe_3O_4 (магнетит), который обнаруживает большую положительную магнитострикцию. Она тем больше, чем меньше начальная магнитная проницаемость. Магнитострикция уменьшается при приближении температуры к точке Кюри.

От направления магнитного поля знак и величина магнитострикции не зависит. При сжатии образца эффект магнитострикции ослабляется. В зависимости от состава ферриты могут быть получены как с большой ($30 \cdot 10^{-6}$), так и с малой, практически нулевой, магнитострикцией.

Магнитострикционные свойства ферритов могут быть использованы для изготовления магнитострикционных фильтров и электромеханических преобразователей.

Рассмотрим принцип работы магнитострикционного преобразователя. На фиг. 13 изображен магнитострикционный

резонатор. Стержень из феррита поддерживается в частично намагниченном состоянии постоянным током (фиг. 13,*а*) или магнитом (фиг. 13,*б*), а переменный ток, протекающий через катушку, расположенную на ферритовом стержне, попеременно увеличивает и уменьшает намагничивание стержня. Это создает соответствующее уменьшение и увеличение длины стержня, так как изменение размеров феррита пропорционально его намагничиванию. Таким образом, электрические колебания преобразуются в механические колебания. При совпадении частоты переменного магнитного поля с собственной частотой стержня механические колебания будут наиболее интенсивными.



Фиг. 14. Схема трехконтурного фильтра.
а — электрического; *б* — магнитострикционного.

Существует много областей, в которых можно с успехом использовать действие механического резонанса на параметры электрического колебательного контура. Как известно, кристаллы кварца нашли широкое применение для контроля частоты в генераторах, в качестве элементов многозвенных фильтров и т. д. Применение магнитострикционных резонаторов на ранее известных магнитострикционных материалах (никель и др.) на радиочастотах было ограничено вследствие того, что данные материалы вносили большие потери в возбуждающую катушку. Ферриты не вносят больших потерь на высоких частотах вследствие того, что они имеют высокое электрическое сопротивление.

Для примера на фиг. 14,*а* изображен простой трехконтурный фильтр, позволяющий получить хорошую избирательность, а на фиг. 14,*б*—трехконтурный фильтр с ферритовым стержнем в качестве среднего контура, расположенным между двумя настроенными контурами. Во входной катушке фильтра $L_{вх}$ посредством магнитострикции электрическая энергия преобразуется в механическую. На выходе фильтра $L_{вых}$ происходит обратное явление:

механическая энергия снова преобразуется в электрическую. Этот магнитострикционный резонатор точно эквивалентен электрическому контуру, изображенному на фиг. 14, *а*, причем он имеет значительно меньшие потери, что позволяет получить лучшую кривую избирательности фильтра.

5. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФЕРРИТОВ

Ферриты по своим электрическим свойствам относятся к классу полупроводников и обладают не только магнитными, но и диэлектрическими свойствами. При использовании ферритов на высокой частоте их диэлектрические параметры играют весьма существенную роль, так как они вызывают образование емкости между обмоткой и сердечником. Поэтому необходимо знать диэлектрическую проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon$, которые характеризуют диэлектрические свойства данного материала.

Ферриты имеют большую диэлектрическую проницаемость (на низких частотах) и большой тангенс угла диэлектрических потерь. Установлено, что с повышением частоты диэлектрическая проницаемость всех ферритов падает.

Таблица 5

Диэлектрические свойства никель-цинковых ферритов

Начальная магнитная проницаемость феррита	$f = 5$ *кгц*		$f = 50$ *кгц*		$f = 500$ *кгц*	
	ε	$\operatorname{tg}\delta_\varepsilon$	ε	$\operatorname{tg}\delta_\varepsilon$	ε	$\operatorname{tg}\delta_\varepsilon$
1 000	1 235	1,5	190	2,3	30	1,9
500	225	1,7	65	0,7	35	0,35
100	107	0,32	78	0,31	48	0,31

В табл. 5 приведены диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь ферритов при разных частотах. Здесь видно, что на более высоких частотах разница между значениями диэлектрической проницаемости для разных ферритов уменьшается. Ферриты с меньшей проницаемостью имеют меньший тангенс угла диэлектрических потерь при более высоких частотах. Наиболее высокой диэлектрической проницаемостью обладают марганец-цинковые ферриты с высокой магнитной проницаемостью, у которых при низкой частоте ε достигает сотен тысяч.

Одновременное наличие больших значений ε и μ может привести к тому, что длина электромагнитной волны в ферритовом сердечнике станет равной наименьшему из его размеров, в результате чего будет иметь место объемный резонанс, напряженность поля внутри сердечника станет очень большой и потери резко возрастут. Для одного из марганец-цинковых ферритов, имеющего $\varepsilon = 100\,000$, частота такого резонанса близка к 1 *мгц* при сечении сердечника 1 $см^2$.

6. СТАБИЛЬНОСТЬ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ВО ВРЕМЕНИ

Исследования стабильности проницаемости ферритов показали, что чем меньше их проницаемость, тем они более стабильны. Установлено также, что наиболее резкое изменение проницаемости во времени происходит в первый месяц после их изготовления.

Поэтому после изготовления ферритов производится их принудительное (искусственное) старение (нагрев до температуры 200°, выдержка при этой температуре в течение 2 час., медленное охлаждение затем до комнатной температуры в течение 4 часов). После искусственного старения ферриты изменяют свою проницаемость в течение года от $\pm 0,3$ до $\pm 1\%$.

7. ФЕРРИТЫ С БОЛЬШОЙ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛОЙ

В природе существует минерал $PbO6Fe_2O_3$, обладающий слабо выраженными магнитными свойствами. Если в этом минерале свинец заменить барием, стронцием или кальцием, то образуются материалы, имеющие большую коэрцитивную силу, которые используются в качестве постоянных магнитов. Такие материалы называют бариевыми оксидными магнитами или ферроксдюрами.

Данные магниты имеют следующие основные параметры: 1) большое электрическое сопротивление — порядка 10^8 *ом · см*; 2) коэрцитивную силу 1 600—3 000 *эрс*; 3) остаточную индукцию 2 000—3 500 *гс*; 4) индукцию насыщения 4 200—4 800 *гс*; 5) максимальную энергию до $3,5 \cdot 10^6$ *гс · эрс*; 6) удельный вес 4,8 $г/см^3$; 7) температурный коэффициент индукции минус 0,2% на 1° С.

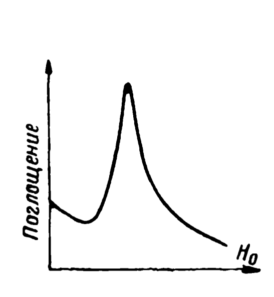
Особенность бариевых оксидных магнитов состоит в том, что их коэрцитивная сила с повышением температуры растет. Такие магниты можно нагревать вплоть до темпера-

туры 400° С, не нарушая их постоянного намагничивания. Обычные литые магниты, как известно, при нагревании размагничиваются.

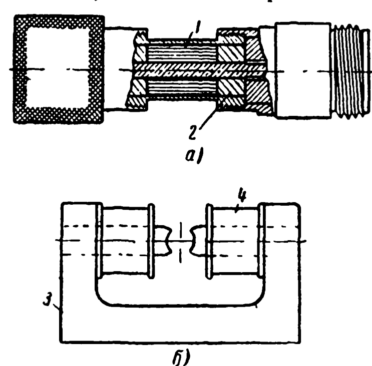
Бариевые оксидные магниты можно изготовлять в форме диска, не боясь их размагничивания, вследствие того, что их магнитная проницаемость близка к единице.

8. СВОЙСТВА ФЕРРИТОВ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Ферриты в ненамагниченном состоянии на сверхвысоких частотах представляют собой диэлектрик с магнитной проницаемостью, близкой к единице, и с диэлектрической про-



Фиг. 15. Характер зависимости потерь в феррите от напряженности намагничивающего поля на сверхвысоких частотах.



Фиг. 16. Устройство магнитного ослабителя.

а — отрезок коаксиальной линии (*1* — феррит; *2* — изолятор); *б* — электромагнит (*3* — железо Армко; *4* — обмотка.)

ницаемостью порядка 10—15. При наличии же магнитного поля ферриты приобретают свойства, позволяющие использовать их на сверхвысоких частотах. Рассмотрим эти свойства и возможность их использования.

Резонансное поглощение. У ферритов, имеющих относительно высокую магнитную проницаемость и малые потери на частотах ниже 30 *мггц,* при более высоких частотах возникают значительные потери. Установлено, что эти потери зависят от величины магнитного поля в феррите. На сверхвысоких частотах зависимость потерь в феррите от напряженности поля носит резонансный характер, т. е. для данной частоты и материала существует такое поле, при котором потери будут максимальными (фиг. 15). Это явление позволяет создать ряд устройств, использующих поглощающие свойства ферритов на сверхвысоких частотах.

Рассмотрим устройство магнитного ослабителя. Как показано на фиг. 16, магнитный ослабитель состоит из двух основных частей: короткого отрезка коаксиальной линии, в который помещен феррит, заполняющий пространство между внутренним и внешним проводниками, и электромагнита, создающего магнитное поле в феррите. Электромагнит имеет раздвижные полюсные наконечники для возможности введения и удаления отрезка коаксиальной линии.

Резонансный характер поглощения у разных типов ферритов различен. Наиболее подходящим материалом для ослабителя является материал, обладающий острой резонансной кривой поглощения в зависимости от напряженности магнитного поля. Показанный на фиг. 16 ослабитель позволяет изменять мощность в линии в отношении 60 : 1. Для такого ослабления необходимо поле порядка 1 000—1 500 *эрс.*

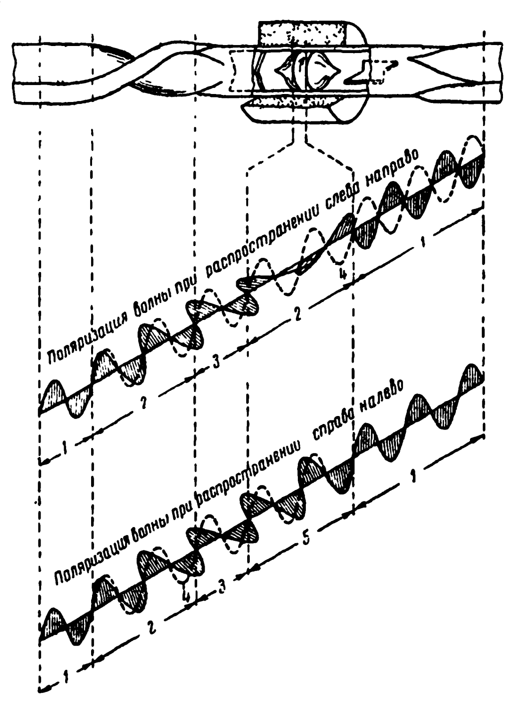
Вращение плоскости поляризации — эффект Фарадея. Известно, что электромагнитные волны представляют собой поперечные волны; электрические и магнитные силовые линии у них взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны. По аналогии с оптикой будем называть направление распространения волны поперечного типа лучом.

Плоскость, проходящая через луч и через направление колебаний, носит название плоскости колебаний, а плоскость, проходящая через луч и перпендикулярная к направлению колебаний, называется плоскостью поляризации. При прохождении электромагнитной волны через поляризатор (тело, пропускающее колебания, лежащие в одной определенной плоскости) получается плоскополяризованная волна.

Если через феррит, помещенный в постоянное магнитное поле, пропустить в направлении поля плоскополяризованную волну, то она распадается на две волны, поляризованные по кругу в противоположных направлениях относительно постоянного поля, т. е. на правополяризованную и левополяризованную волны. Правополяризованными волнами называются волны, поляризованные по кругу в направлении движения часовой стрелки относительно наблюдателя, смотрящего вдоль направления постоянного магнитного поля, а левополяризованными — волны, поляризованные в противоположном направлении.

Установлено, что фазовая скорость (скорость, с которой

распространяется данная фаза волны вдоль волновода) и поглощение зависят от напряженности постоянного поля. Для правополяризованной волны эта зависимость имеет резонансный характер, а для левополяризованной волны фазовая скорость и поглощение меняются монотонно.



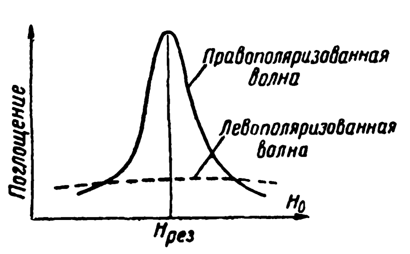
Фиг. 17. Гиратор для сантиметровых волн и пояснительные диаграммы.

1 — вертикально поляризованная волна, *2* — поворот на 90° против часовой стрелки; *3* — горизонтально поляризованная волна, *4* — постоянная вертикально поляризованная волна; *5* — поворот на 90° по часовой стрелке.

Правополяризованные и левополяризованные волны при выходе из феррита образуют снова плоскополяризованную волну с плоскостью поляризации, повернутой из-за различных скоростей распространения на некоторый угол относительно плоскости поляризации падающей волны. Угол поворота плоскости поляризации зависит от длины образца и напряженности намагничивающего поля.

Явление вращения плоскости поляризации веществами под действием магнитного поля (обнаруженное для света

Фарадеем в 1846 г.) используется в устройстве, называемом гиратором. В гираторе имеется феррит, который дает поворот плоскости поляризации на 90°. Если падающая волна проходит через такой феррит, то сдвиг фаз по отношению к падающей волне будет равен 90°. Рассмотрим теперь отраженную каким-либо элементом устройства волну. Она, пройдя феррит, претерпит сдвиг фаз на 90°. Таким образом, между падающей волной и отраженной волной после прохождения последней через ферритовую пластинку будет сдвиг фаз на 180°, т. е. падающая и отраженная волны могут быть легко разделены (фиг. 17).



Фиг. 18. Зависимость поглощения правополяризованных и левополяризованных волн в феррите от напряженности намагничивающего поля.

На свойстве различного поглощения волн, поляризованных по кругу в противоположных направлениях, основано устройство вентиля, т. е. системы одностороннего действия. Пусть в волновод помещен столбик из феррита, намагниченной до поля $H = H_{рез}$, т. е. поля, при котором наблюдается резкое различие в поглощении правополяризованных и левополяризованных волн (фиг. 18). Если на феррит попадает после поляризатора левополяризованная волна, то она почти полностью пройдет через феррит, так как поглощение ее ферритом незначительно, и далее она превращается с помощью поляризатора в плоскополяризованную волну. Если произойдет отражение данной волны, то, пройдя обратно через поляризатор, она будет уже правополяризованной по отношению к направлению поля в феррите, следовательно, поглотится ферритом, т. е. будет иметь место однонаправленное распространение энергии. Свойство ферритов на сверхвысоких частотах, т. е. поворот плоскости поляризации при прохождении плоскополяризованной волны и неодинаковое поглощение левополяризованных и правополяризованных волн, зависимость их от напряженности намагничивающего поля могут быть использованы для создания быстродействующих переключателей, вентильных устройств, ответвителей энергии, развязывающих устройств, модуляторов и т. д.

ГЛАВА ВТОРАЯ

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КАТУШЕК С ФЕРРИТОВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

В гл. 1 были рассмотрены основные свойства ферритов как материала. Все параметры относились к замкнутой форме сердечника при отсутствии потоков рассеяния.

Катушки индуктивности с ферритовыми сердечниками с замкнутым магнитопроводом имеют малые габариты, небольшую добротность, большие значения температурного коэффициента индуктивности, значительные изменения добротности и индуктивности от уровня сигнала переменного тока и величины подмагничивающих ампер-витков.

Однако, если для катушек индуктивности применять магнитопроводы с оптимальным воздушным зазором или сердечники разомкнутой формы, то их параметры будут значительно улучшены. Ниже будут рассмотрены вопросы расчета и конструирования катушек индуктивности с ферритовыми сердечниками.

9. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАТУШЕК

Индуктивность катушки с замкнутым сердечником при отсутствии потоков рассеяния вычисляется по формуле

$$L = 0{,}4\pi w^2 \mu_{\sim} \frac{S}{l_c} 10^{-8}, \tag{6}$$

где L — индуктивность катушки, *гн*;

w — число витков;

S — сечение сердечника, *см*^{2};

l_c — средняя длина силовой линии, *см*;

$\mu_{\sim}$ — динамическая магнитная проницаемость.

В практике приходится иметь дело с различной формой сердечников, отличной от замкнутой. Так, например, часто используются броневые, Ш-образные и П-образные сердечники с зазором, цилиндрические, а также другие незамкнутые сердечники. Очевидно, что в силу влияния потоков рассеяния параметры таких сердечников будут отличны от параметров, измеренных на замкнутых тороидальных сердечниках, т. е. параметров материала.

Пусть, например, в броневом сердечнике имеется зазор, тогда индуктивность катушки с данным сердечником уменьшится во столько раз, во сколько раз возрастет магнитное

сопротивление этого незамкнутого магнитопровода по сравнению с замкнутым:

$$L' = L\frac{R_м}{R_м + R_з}, \tag{7}$$

где L — индуктивность катушки с сердечником без зазора;
L' — индуктивность катушки с сердечником с зазором;
$R_м$ — магнитное сопротивление сердечника без зазора;
$R_з$ — магнитное сопротивление зазора.

Магнитное сопротивление $R_м$ выражается формулой

$$R_м = \frac{l_c}{\mu_{\sim} S}. \tag{8}$$

Для сердечника с одинаковым сечением вдоль магнитопровода можно написать:

$$\frac{R_з}{R_м} = \mu_{\sim}\frac{l_з}{l_c}, \tag{9}$$

где $l_з$ — длина зазора.

Следовательно, индуктивность катушки, имеющей сердечник с зазором,

$$L' = \frac{L}{1 + \mu_{\sim}\frac{l_з}{l_c}} = \frac{0{,}4\pi w^2 S\mu_{\sim}10^{-8}}{l_c}\cdot\frac{1}{1 + \mu_{\sim}\frac{l_з}{l_c}}. \tag{10}$$

Эта формула справедлива в том случае, если зазор не превышает $1^0/_0$ длины силовой линии сердечника и динамическая магнитная проницаемость материала сердечника не меньше нескольких сот гаусс на эрстед.

Введем обозначение

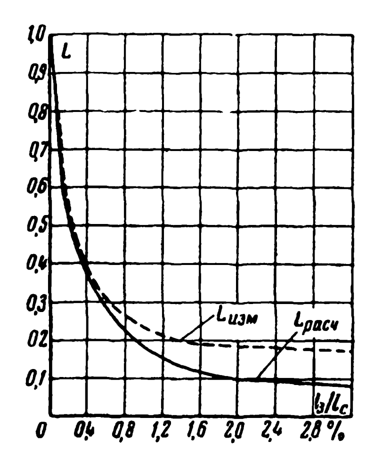
$$\mu_д = \frac{\mu_{\sim}}{1 + \mu_{\sim}\frac{l_з}{l_c}} \tag{11}$$

и назовем его действующей магнитной проницаемостью сердечника. Тогда формулу (10) можно записать в следующем виде:

$$L' = \frac{0{,}4\pi w^2 S\mu_д}{l_c}10^{-8}. \tag{12}$$

Таким образом, индуктивность катушки с ферритовым замкнутым сердечником, имеющим небольшой воздушный зазор, может быть определена по формуле (12), если известна действующая магнитная проницаемость сердечника, определяемая не только материалом сердечника, но и его формой.

На фиг. 19 показаны расчетные и измеренные значения индуктивности катушки в зависимости от отношения длины зазора к длине магнитной силовой линии сердечника.



Фиг. 19. Расчетные $L_{расч}$ и измеренные $L_{изм}$ значения индуктивности катушки с сердечником в зависимости от отношения длины зазора $l_з$ к длине магнитной силовой линии l_c сердечника.

Здесь видно, что при $\frac{l_з}{l_c} \leqslant 0,6\%$ значения рассчитанной по формуле (11) и измеренной индуктивности почти совпадают. При $\frac{l_з}{l_c} = 1\%$ разница между расчетным и измеренным значениями индуктивности составляет 20%, при увеличении $\frac{l_з}{l_c}$ эта разница увеличивается и при $\frac{l_з}{l_c} = 2\%$ она уже достигает 50%. Таким образом, измеренные и рассчитанные по формуле (12) значения индуктивности с достаточной степенью точности совпадают только при $\frac{l_з}{l_c} \leqslant 1\%$.

Для катушек с разомкнутым сердечником (цилиндрические, Т-образные и т. д.) расчет индуктивности может быть произведен по значению относительной магнитной проницаемости $\mu_{отн}$, определяемой как отношение индуктивности катушки с сердечником и индуктивности той же катушки без сердечника. Относительная магнитная проницаемость зависит не только от проницаемости материала и формы сердечника, но и от формы и размеров самой катушки.

Индуктивность катушки с разомкнутым сердечником

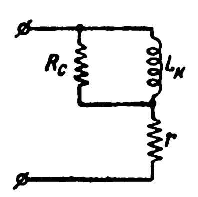
$$L = L_к \mu_{отн}, \tag{13}$$

где $L_к$ — индуктивность катушки без сердечника, значение которой может быть измерено или подсчитано по известным формулам;

$\mu_{отн}$ — относительная магнитная проницаемость сердечника, определяемая экспериментально.

Добротность катушки с сердечником зависит от потерь, вносимых катушкой и сердечником. Увеличение добротности катушки при введении в нее сердечника возможно, если повышение ее индуктивности происходит быстрее, чем возрастают суммарные потери за счет обмотки и сердечника.

Рассмотрим эквивалентную схему катушки с сердечником, в которой сопротивление потерь, вносимое сердечником, включается параллельно, а сопротивление потерь в обмотке последовательно с катушкой индуктивности (фиг. 20).



Фиг. 20. Эквивалентная схема катушки индуктивности с сердечником.

Обозначим через Q_c — добротность сердечника, величину, обратную тангенсу угла потерь в сердечнике. Для замкнутой формы сердечника с равномерным сечением добротность сердечника Q_c определяется физическими свойствами материала и не зависит от размеров сердечника. Можно считать, что в этом случае добротность сердечника представляет собой добротность материала $Q_м$.

Условимся называть добротностью обмотки Q_o отношение индуктивного сопротивления ωL к активному сопротивлению обмотки r:

$$Q_o = \frac{\omega L}{r} = \omega\tau, \tag{14}$$

где $\tau = \frac{L}{r}$ — постоянная времени катушки индуктивности.

Добротность катушки с замкнутым сердечником определяется формулой

$$Q = \frac{Q_o Q_c}{Q_o + Q_c} = \frac{Q_o Q_м}{Q_o + Q_м}. \tag{15}$$

Эта формула может быть упрощена, если $Q_o \gg Q_м$, что часто имеет место при использовании сердечника с боль-

шим значением начальной магнитной проницаемости. Тогда

$$Q = \frac{Q_o Q_м}{Q_o + Q_м} \approx Q_м, \qquad (16)$$

т. е. добротность катушки с замкнутым сердечником без зазора определяется только добротностью его материала.

Введем в сердечник катушки немагнитный зазор, индуктивность катушки уменьшится согласно формуле (10). При введении зазора индукция же в сердечнике практически не изменится, так как она определяется приложенным к катушке напряжением, а следовательно, и вносимые сопротивления потерь R_c и r останутся неизменными. Следовательно, *введение немагнитного зазора в сердечник увеличивает добротность сердечника и уменьшает добротность обмотки во столько раз, во сколько увеличивается магнитное сопротивление магнитопровода.*

Обозначим через Q'_c и Q'_o добротности сердечника и обмотки при наличии зазора в сердечнике. Тогда

$$Q'_c = Q_c\left(1 + \mu_{\sim}\frac{l_з}{l_c}\right), \qquad (17)$$

$$Q'_o = \frac{Q_o}{1 + \mu_{\sim}\frac{l_з}{l_c}}. \qquad (18)$$

Если добротность обмотки с сердечником без зазора выше добротности материала сердечника, то введение зазора, повышая добротность сердечника, увеличивает общую добротность катушки. При определенной величине зазора добротность катушки будет максимальна.

Оптимальный зазор может быть найден по формуле

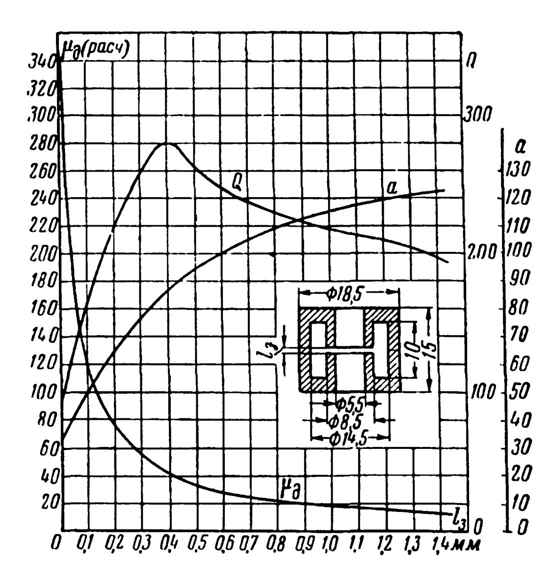
$$l_з = \frac{l_c}{\mu_{\sim}}\left(\sqrt{\frac{Q_o}{Q_м}} - 1\right) = \frac{l_c}{\mu_{\sim}}\left(\sqrt{\frac{\omega\tau}{Q_м}} - 1\right). \qquad (19)$$

Если при вычислении величины зазора по этой формуле результат получается отрицательным, то зазор не нужен (это имеет место, когда добротность магнитного материала при отсутствии зазора выше добротности обмотки).

Максимальная добротность катушки заданных габаритов с сердечником, в котором обеспечен оптимальный воздушный зазор, находится по формуле

$$Q_{макс} = \frac{\sqrt{Q_o Q_м}}{2}. \quad (20)$$

На фиг. 21 приведена кривая зависимости добротности катушки Q с броневым сердечником из феррита с $\mu_0 = 400$ *гс/эрс* от изменения величины зазора $l_з$. При зазоре



Фиг. 21. Кривые изменения $\mu_д$, Q и коэффициента a на $f = 460$ *кгц* в зависимости от величины зазора для броневого сердечника из феррита с $\mu_0 = 400$ *гс/эрс* ($w = 47$ витков ЛЭШО 15×0,05).

$l_з = 0$ добротность равна 90. При увеличении зазора добротность возрастает и достигает максимального значения, равного 280, при оптимальной величине $l_з = 0{,}4$ *мм*. Дальнейшее увеличение зазора приводит к понижению добротности катушки потому, что уменьшение добротности обмотки уже не компенсируется увеличением добротности сердечника.

Добротность обмоток Q_o зависит от ее габаритов. При больших габаритах сопротивление потерь в меди

обмотки будет уменьшаться. Следовательно, при увеличении размеров можно получить большую величину добротности катушки. Это справедливо, если мы рассчитываем катушки на сравнительно низких частотах (до частот 50—100 *кгц*) и в качестве провода обмотки применяем многожильный провод ЛЭШО. На более высоких частотах из-за влияния поверхностного эффекта, вихревых токов и распределенной емкости обмотки увеличение габаритов катушки не всегда повышает ее добротность.

Зависимость добротности катушки с сердечником от ее габаритов может быть представлена в следующем виде:

$$Q_{макс} = K\sqrt{\mu_{\sim} f Q_{м}} = K\sqrt{\mu_{\sim} f \frac{1}{\operatorname{tg}\delta}}. \qquad (21)$$

Коэффициент, пропорциональный габаритам катушки с сердечником,

$$K = 0{,}107\sqrt{\frac{Sq_{м}}{l_c l_{м}}}, \qquad (22)$$

где $l_{м}$ — средняя длина витка обмотки, *см*;

$q_{м}$ — полное сечение меди, равное произведению сечения провода на число витков, *см*^{2}.

Таблица 6

Коэффициент заполнения медью окна сердечника высокочастотных катушек

Марка провода	Сечение меди, *мм*^{2}	Коэффициент заполнения $k_{м}$
ПЭЛ 0,1	0,00785	0,21
ПЭЛ 0,15	0,0177	0,23
ПЭЛ 0,2	0,0314	0,25
ПЭЛШО 0,1	0,00785	0,085
ЛЭШО 7×0,07	0,027	0,09
ЛЭШО 15×0,05	0,0294	0,08

Полное сечение меди может быть также определено из выражения

$$q_{м} = S_{о} k_{м},$$

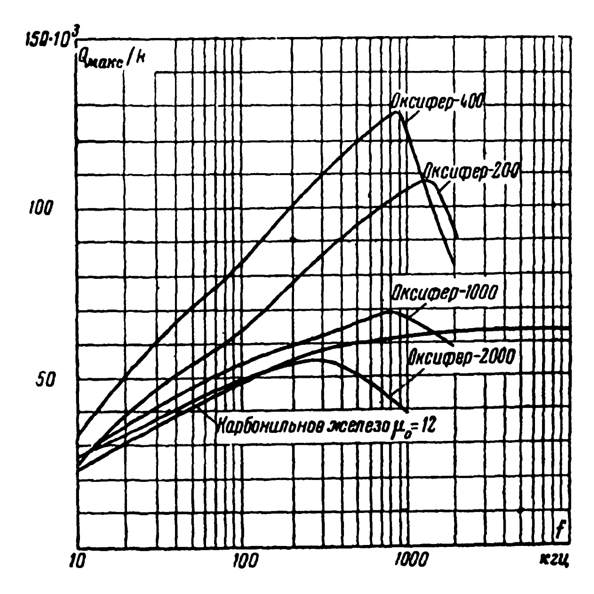
где $S_{о}$ — площадь окна сердечника, *см*^{2};

$k_{м}$ — коэффициент заполнения медью окна сердечника (см. табл. 6).

Преобразуем формулу (21) следующим образом:

$$\frac{Q_{макс}}{K} = \sqrt{\frac{\mu_{\sim} f}{\operatorname{tg} \delta}}. \qquad (23)$$

Правая часть этой формулы показывает, что отношение $\frac{Q_{макс}}{K}$ зависит от частоты, магнитной проницаемости и добротности материала сердечника. Зная проницаемость



Фиг. 22. Зависимость $Q_{макс}/K$ от частоты для различных марок ферритов и карбонильного железа.

и добротность материала в слабых полях, можно построить график зависимости $\frac{Q_{макс}}{K}$ от частоты для различных ферритов.

Из графика фиг. 22 видно, что для одной и той же катушки с сердечником неизменных габаритов при оптимальном зазоре можно получить большую добротность в диапазоне до 1,5 *мггц*, если выбрать в качестве материала сердечника оксифер-400.

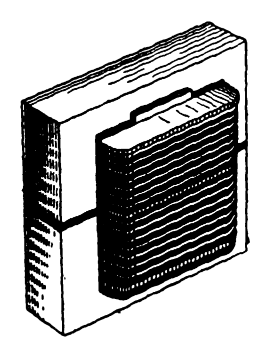
Пример расчета добротности катушки (фиг. 23). Дан сердечник Ш-образной формы из оксифера-400, $S = 1{,}1$ *см*²; $l_c = 8{,}27$ *см*;

$l_м = 5{,}77$ *см*; окно для обмотки имеет сечение 1,95 *см*²; принимая коэффициент заполнения медью окна сердечника равным 0,1, можно считать, что $q_м = 1{,}95 \cdot 0{,}1 = 0{,}195$ *см*²; обмотка намотана проводом ЛЭШО 120 × 0,05.

Найти добротность на частоте 100 *кгц*.

По формуле (22) найдем значение коэффициента

$$K = 0{,}107 \sqrt{\frac{Sq_м}{l_c l_м}} = 0{,}107 \sqrt{\frac{1{,}1 \cdot 0{,}195}{8{,}27 \cdot 5{,}77}} = 0{,}0072.$$



Фиг. 23. Катушка индуктивности с сердечником ОШ-7 из оксифера-400 с большой добротностью.

Из графика фиг. 22 находим для оксифера-400 на частоте 100 *кгц* значение

$$\frac{Q_{макс}}{K} \approx 80\,000,$$

откуда

$$Q_{макс} = 0{,}0072 \cdot 80\,000 = 576.$$

Измеренное значение добротности на частоте 100 *кгц* оказалось равным 550.

На более высоких частотах (выше 100 *кгц*) графиком фиг. 22 пользоваться для расчетов не рекомендуется, так как при построении этого графика не учитывались потери на поверхностный эффект.

Формулу (21) для практических расчетов добротности катушек с сердечником, имеющим оптимальный воздушный зазор, когда есть возможность измерить (или рассчитать) добротность катушки без сердечника, можно представить в следующем виде:

$$Q_{макс} = \frac{1}{2} \sqrt{Q_к \mu_{отн.\,макс} Q_м}, \qquad (24)$$

где $Q_к$ — добротность катушки без сердечника;

$\mu_{отн.\,макс}$ — относительная максимальная проницаемость, равная отношению индуктивности катушки с сердечником без зазора к индуктивности катушки без сердечника;

$Q_м$ — добротность материала сердечника, находится из графиков зависимости потерь от частоты.

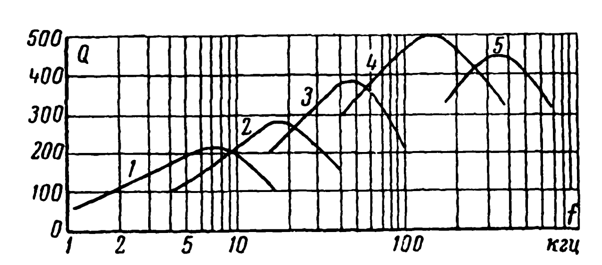
Значения $\mu_{отн.\,макс}$ для сердечников замкнутой формы (Ш-образные и броневые сердечники) можно найти из табл. 7.

Таблица 7

Значения $\mu_{отн.\ макс}$ для броневых сердечников в зависимости от проницаемости материала сердечника

μ_0	$\mu_{отн.\ макс}$	μ_0	$\mu_{отн.\ макс}$	μ_0	$\mu_{отн.\ макс}$
1 000	150	400	90	25	8
700	100	90	25	12	4

Формула (24) позволяет быстро определить ориентировочное значение максимальной добротности при оптимальном зазоре. Она справедлива до частоты порядка



Фиг. 24. Зависимость добротности катушек с броневым сердечником из феррита с $\mu_0 = 700$ *гс/эрс* от частоты.

нескольких мегагерц. Оптимальный воздушный зазор в этом случае находится по измененной формуле

$$l_з = \frac{l_c}{\mu_\sim}\left(\sqrt{\frac{Q_к \mu_{отн.\ макс}}{Q_м}} - 1\right). \qquad (25)$$

На фиг. 24 и в табл. 8 приведены практически реализованные значения добротности для броневых сердечников из феррита с $\mu_0 = 700$ *гс/эрс*.

Таблица 8

Параметры катушек с броневым сердечником из феррита с $\mu_0 = 700$, наружным диаметром 25 и высотой 16 *мм*

Кривая на фиг. 24	Зазор, *мм*	Число витков	Провод	Индуктивность, *мгн*	ТК $\mu_д \cdot 10^6$
1	0,15	1 280	ПЭЛ 0,14	625	500
2	0,25	620	ПЭЛ 0,18	100	350
3	0,45	185	ЛЭШО 20×0,07	2	190
4	0,85	96	ЛЭШО 20×0,07	1	110
5	1,8	39	ЛЭШО 90×0,04	0,1	60

Температурный коэффициент индуктивности катушки с ферритовыми сердечниками. Температурный коэффициент индуктивности катушки

$$ТКИ = \frac{L_2 - L_1}{L_1 \Delta t}, \qquad (26)$$

где L_1 — индуктивность катушки при температуре t_1;

L_2 — то же при температуре t_2;

$\Delta t = t_2 - t_1$.

Для катушек индуктивности с замкнутым сердечником может быть написано, что

$$ТКИ = ТК\mu_0. \qquad (27)$$

Это равенство справедливо потому, что температурным коэффициентом индуктивности обмотки можно пренебречь из-за сравнительно большого температурного коэффициента магнитной проницаемости сердечника.

Температурный коэффициент индуктивности катушки с сердечником, имеющим небольшой зазор, может быть определен по формуле

$$ТКИ = \frac{ТК\mu_0}{1 + \frac{l_з}{l_c}\mu_0}. \qquad (28)$$

Данная формула справедлива для случая, когда $\frac{l_з}{l_c} \leqslant 0{,}01$. Если через катушку индуктивности протекают одновременно переменный и постоянный токи, то в формулы (27) и (28) вместо температурного коэффициента начальной проницаемости $ТК\mu$ подставляется температурный коэффициент обратимой магнитной проницаемости $ТК\mu_r$.

Для катушек с разомкнутым сердечником (или с большим воздушным зазором)

$$ТКИ = \frac{ТКИ_к}{\mu_{отн}} + ТК\mu_д\left(1 - \frac{1}{\mu_{отн}}\right), \qquad (29)$$

где $ТКИ_к$ — температурный коэффициент индуктивности катушки;

$TK\mu_{\partial}$ — температурный коэффициент действующей магнитной проницаемости;

$\mu_{отн}$ — относительная магнитная проницаемость.

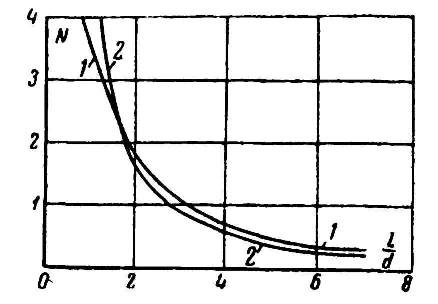
Температурный коэффициент действующей проницаемости сердечника может быть определен, если известны μ_0, $TK\mu_0$ и μ_{∂} сердечника:

$$TK\mu_{\partial}=\frac{\mu_{\partial}}{\mu_0}TK\mu_0. \tag{30}$$

Для сердечников с разомкнутой магнитной цепью

$$\mu_{\partial}=\frac{4\pi\mu_0}{4\pi+N(\mu_0-1)}, \tag{31}$$

где N — размагничивающий фактор (для тороида $N=0$, для длинного цилиндра, длина которого во много раз больше диаметра, $N\to 0$, для тонкой пластинки, расположенной перпендикулярно к полю, $N\to 4\pi$).



Фиг. 25. Зависимость размагничивающего фактора от отношения длины образца к диаметру круга, равновеликого его поперечному сечению.

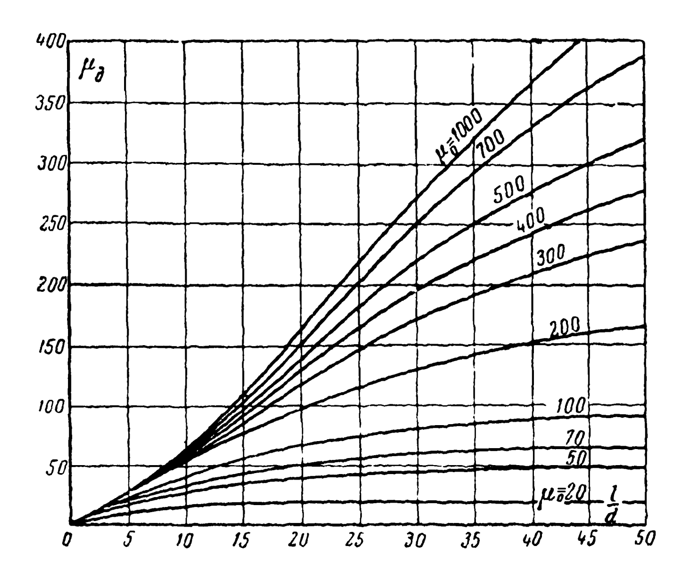
1 — детали квадратного сечения; *2* — цилиндрические детали.

Размагничивающий фактор для цилиндрических сердечников может быть определен из графика фиг. 25, где приведена зависимость размагничивающего фактора от отношения длины сердечника к его диаметру.

На фиг. 26 показана зависимость μ_{∂} цилиндрического сердечника от отношения его длины к диаметру для различных значений проницаемости материала. Данный график получен расчетным путем согласно формуле (31).

Для других форм сердечников размагничивающий фактор определяется экспериментально.

Пример расчета ТКИ катушки с сердечником. Дана катушка с сердечником из оксифера-400 диаметром $d=9$ *мм* и длиной $l=19$ *мм*; температурный коэффициент индуктивности катушки без сердечника $ТКИ_к=20\cdot10^{-6}$; при введении сердечника в катушку ее индуктивность увеличивается в 4,5 раза. Определить ТКИ катушки с сердечником,



Фиг. 26. Зависимость μ_∂ сердечника от отношения его длины к диаметру при различных значениях μ_0.

Для данного сердечника $\left(\frac{l}{d} = \frac{19}{9} = 2,11\right)$ размагничивающий фактор $N = 1,5$ (согласно фиг. 25). При этом

$$\mu_\partial = \frac{4\pi\mu_0}{4\pi + N(\mu_0 - 1)} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 400}{4 \cdot 3,14 + 1,5 \cdot 399} = 14,8;$$

$$TK\mu_\partial = \frac{TK\mu_0}{\mu_0}\mu_\partial = \frac{2\,000 \cdot 10^{-6}}{400} \cdot 14,8 = 74 \cdot 10^{-6};$$

$$TKИ = \frac{TKИ_к}{\mu_{отн}} + TK\mu_\partial\left(1 - \frac{1}{\mu_{отн}}\right) =$$

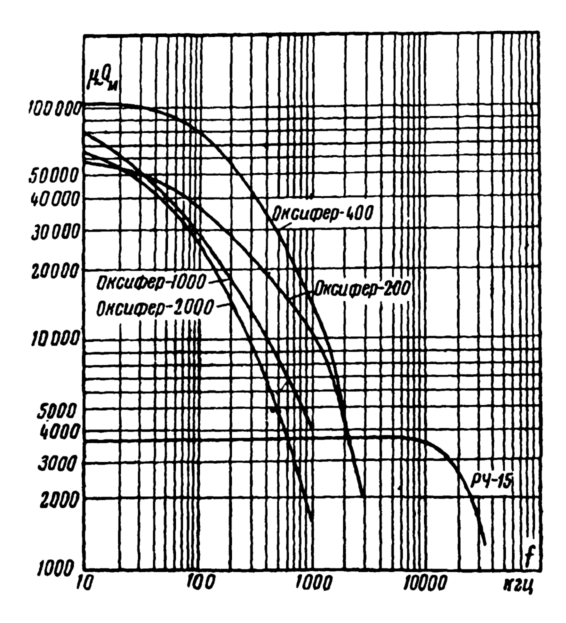
$$= \frac{20 \cdot 10^{-6}}{4,5} + 74 \cdot 10^{-6}\left(1 - \frac{1}{4,5}\right) = 62 \cdot 10^{-6}.$$

10. ВЫБОР МАТЕРИАЛА СЕРДЕЧНИКА

В устройствах, где сердечник из магнитного материала используется для увеличения или изменения индуктивности или для увеличения добротности (контурные катушки, катушки фильтров промежуточной частоты, дроссели, магнитные антенны и т. д.), материал сердечника может быть выбран, если известны μ и $\operatorname{tg}\delta$ мате-

риала на используемом диапазоне частот, $TK\mu_0$ и рабочий диапазон температур.

Из формулы (21) видно, что максимальная добротность катушки с сердечником пропорциональна корню квадратному из произведения $\mu_{\sim}Q_м$. Поэтому для выбора материала сердечника целесообразно ввести параметр $\mu_{\sim}Q_м$. Зависимость $\mu_{\sim}Q_м$ от частоты для различных марок ферритов приведена на фиг. 27. Для наиболее эффектив-



Фиг. 27. Зависимость $\mu_{\sim}Q_м$ от частоты для различных марок ферритов.

ного использования сердечника, т. е. для получения при небольших его габаритах высокой добротности, материал сердечника должен быть выбран таким, чтобы при заданной частоте $\mu_{\sim}Q_м$ было максимальным.

Ферритовые сердечники с начальной проницаемостью 2 000 и 1 000 *гс/эрс* рекомендуется использовать на частотах до сотен килогерц. Наибольшее распространение они получили как сердечники входных и выходных широкополосных трансформаторов, трансформаторов строчной развертки, отклоняющих систем и дросселей.

Сердечники с начальной проницаемостью 200—600 *гс/эрс* используются в диапазоне частот от 100 до 1 600 *кгц* для контурных катушек, катушек фильтров промежуточной частоты, магнитных антенн, вариометров, высокочастотных дросселей.

Ферриты с проницаемостью 40—100 *гс/эрс* используются в диапазоне частот от 1 до 10 *мггц*.

Ферритовые сердечники с начальной проницаемостью 10—15 *гс/эрс* используются в диапазоне частот от 1 до 50 *мггц* для катушек индуктивности фильтров и контуров.

С сердечниками, обладающими небольшой проницаемостью, можно получить на частотах от 10 до 100 *мггц* добротность выше, чем с аналогичными по форме сердечниками из карбонильного железа.

Сердечники из оксифера И-5 и И-4 обладают наибольшей индукцией насыщения, кроме того, они имеют высокую предельно допустимую рабочую температуру. Они находят применение в высокочастотных устройствах повышенной мощности, работающих при больших индукциях, например в устройствах для высокочастотного нагрева.

11. ПОРЯДОК РАСЧЕТА КАТУШЕК

Расчет катушек рекомендуется вести в следующем порядке.

1. Выбрать материал сердечника (по фиг. 27), имеющий наибольшее значение $\mu_{\sim} Q_м$ при заданной частоте.

2. Выбрать форму сердечника, исходя из требований, предъявляемых к катушке индуктивности (L, ТКИ, Q, допустимые изменения индуктивности от амплитуды переменного напряжения, от величины постоянного подмагничивающего тока и т. д.).

Для сердечника замкнутой формы

3. Определить число витков, необходимое для получения заданной индуктивности. Согласно формуле (6)

$$w = \sqrt{\frac{Ll_c \cdot 10^8}{0,4\pi\mu_{\sim} S}}.$$

Средняя длина силовой линии l_c определяется из размеров сердечника. Если сердечник имеет неравномерное сечение, то в формулу подставляется не средняя длина

силовой линии, а приведенная длина силовой линии, определяемая из выражения

$$l_c = l_1 + \frac{S_1}{S_2} l_2 + \frac{S_1}{S_3} l_3 + \ldots,$$

где l_1, l_2, $l_3, \ldots$ — длины силовых линий, соответствующих сечениям S_1, S_2, $S_3, \ldots$

4. Определить добротность катушки по формуле (15) или (16).

5. Определить температурный коэффициент индуктивности по формуле (27).

6. Определить значения индуктивности катушки при изменении напряжения на ней от u_1 до u_2. Для этого определяется индукция, соответствующая заданному напряжению u по формуле

$$B = \frac{u \cdot 10^8}{2\pi f w S}.$$

По кривой зависимости $\mu_\sim = \varphi(B)$ определяют μ_1 и μ_2, соответствующие индукциям при напряжении u_1 и u_2. Отношение μ_1/μ_2 даст изменение индуктивности при изменении амплитуды сигнала на катушке от u_1 до u_2.

7. Определить изменение индуктивности от постоянного подмагничивающего тока I. Для этого определим поле подмагничивания

$$H_1 = \frac{1{,}25 I w}{l_c},$$

где I — ток подмагничивания;
l_c — средняя или приведенная длина силовой линии;
w — число витков.

По зависимости $\mu_r = \varphi(H)$ определяем μ_r, соответствующее подмагничивающему полю H (см. фиг. 10). Отношение μ_0/μ_r определяет изменение индуктивности от тока подмагничивания. (При наличии тока подмагничивания, протекающего через катушку индуктивности, температурный коэффициент последней будет определяться не $TK\mu_0$, а $TK\mu_r$ по фиг. 12.)

Для сердечника с небольшим зазором ($l_з/l_c \leqslant 0{,}01$)

3. Определить максимальную добротность, которую можно получить с выбранным сердечником при оптималь-

ном зазоре для частот ниже 100 *кгц* по формуле (21) и для частот выше 100 *кгц* по формуле (24).

4. Определить величину оптимального зазора по формуле (19) или (25).

5. Определить ТКИ катушки при отсутствии тока подмагничивания по формуле (28). Если полученное значение ТКИ будет больше заданного, то зазор нужно увеличить.

6. Определить число витков, необходимых для получения заданной индуктивности. Если $l_з/l_c \leqslant 0{,}01$, то согласно формуле (10) или (12) число витков

$$w = \sqrt{\frac{L' l_c \cdot 10^8}{0{,}4\pi \mu_\partial S}}.$$

Если же $l_з/l_c > 0{,}01$, то для определения числа витков пользуются экспериментальными данными.

7. Определить значения индуктивности катушки при изменении напряжения на ней от u_1 до u_2. Для этого, так же как в случае замкнутого сердечника определяют значения индукции B_1 и B_2, соответствующие u_1 и u_2, и по зависимости $\mu_\sim = \varphi(B)$ находят μ_1 и μ_2. Далее по формуле (11) определяют $\mu_{\partial 1}$ и $\mu_{\partial 2}$, соответствующие μ_1 и μ_2. Отношение $\mu_{\partial 1}/\mu_{\partial 2}$ показывает изменение индуктивности от изменения напряжения на катушке.

8. Определить изменение индуктивности при наличии тока подмагничивания I. Для этого определим напряженность H_1 подмагничивающего поля по формуле, приведенной на стр. 43. Определим затем индукцию в сердечнике с зазором по формуле

$$B_1 = \frac{0{,}4\pi I w}{l_з}.$$

На графике основной кривой намагничивания $B = \varphi(H)$ отложим по осям найденные значения B_1 и H_1. Прямая, соединяющая эти две точки, пересечет кривую $B = \varphi(H)$. Абсцисса точки пересечения и будет напряженностью поля в феррите. Определим значение обратимой магнитной проницаемости феррита μ_r при найденном значении напряженности подмагничивающего поля. Отношение μ_0/μ_r определяет изменение индуктивности от тока подмагничивания.

9. Определить температурный коэффициент индуктивности при наличии тока подмагничивания I. Определив

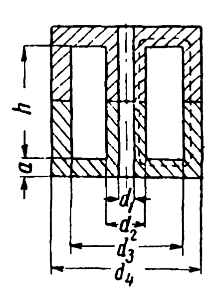
поле в феррите, как указано выше, по графику фиг. 12 $TK\mu_r = \varphi(H)$ находят $TK\mu_r$ и по графику фиг. 10 $\mu_r = \varphi(H)$ находят μ_r при найденном значении напряженности подмагничивающего поля. Температурный коэффициент катушки с ферритовым сердечником с небольшим зазором определится по формуле (28).

Пример расчета. Катушка индуктивности на частоте 460 *кгц* должна удовлетворять следующим требованиям: $L = 1{,}2$ *мгн*; $Q \geqslant 200$; $TKИ \leqslant 100 \cdot 10^{-6}$; $\Delta L/L \leqslant 0{,}01$ при изменении амплитуды сигнала от $u_1 = 0{,}1$ *в* до $u_2 = 20$ *в*.

1. По фиг. 27 выбираем материал сердечника. На частоте $f = 460$ *кгц* наибольшее значение $\mu_{\sim} Q_м$ имеет оксифер-400.

2. Выбираем сердечник броневой формы следующих размеров (фиг. 28): $d_1 = 5{,}5$ *мм*; $d_2 = 8{,}5$ *мм*; $d_3 = 14{,}5$ *мм*; $d_4 = 18{,}5$ *мм*; $h = 10$ *мм*; $a = 2{,}5$ *мм*.

Определим l_c сердечника. Так как сердечник имеет неравномерное сечение, вместо средней длины силовой линии берется приведенная длина силовой линии, определяемая из выражения



Фиг. 28. Сечение броневого сердечника.

$$l_c = l_1 + \frac{S_1}{S_2} l_2 + \frac{S_1}{S_3} l_3 + \ldots$$

Так как

$$S_1 = \frac{\pi}{4}(d_2^2 - d_1^2) = \frac{3{,}14}{4}(0{,}85^2 - 0{,}55^2) = 0{,}42 \ см^2,$$

$$S_2 = \frac{\pi}{4}(d_4^2 - d_3^2) = \frac{3{,}14}{4}(1{,}85^2 - 1{,}45^2) = 1{,}32 \ см^2,$$

$$S_3 = \pi \frac{d_2 + d_3}{2} a = \frac{3{,}14}{4}(0{,}85 + 1{,}45) \cdot \frac{1}{2} 0{,}25 = 0{,}91 \ см^2,$$

$$l_1 = l_2 = 1 \ см, \quad l_3 = \frac{d_3 - d_2}{2} = \frac{1{,}45 - 0{,}85}{2} = 0{,}3 \ см,$$

$$l_4 = \pi a = 3{,}14 \cdot 0{,}25 = 0{,}78 \ см,$$

то

$$l_c = 1 + \frac{0{,}42}{1{,}32} \cdot 1 + 2\frac{0{,}42}{0{,}91} \cdot 0{,}3 + \frac{0{,}42}{0{,}91} \cdot 0{,}78 = 1{,}96 \ см.$$

3. Определим по формуле (24) добротность, которую можно получить с выбранным сердечником при оптимальном зазоре. Для этого из табл. 7 находим, что для оксифера-400 $\mu_{отн.макс} = 90$. Примем, что добротность катушки без сердечника $Q_к$ на частоте 460 *кгц* равна 60. По фиг. 4 найдем, что на частоте 460 *кгц* для окси-

фера-400 тангенс угла потерь равен 0,015 или $Q_м = \frac{1}{0,015} = 66$. Отсюда

$$Q_{макс} = \frac{1}{2}\sqrt{60 \cdot 90 \cdot 66} \approx 300.$$

Следовательно, заданная добротность 200 может быть получена.

4. Определим величину зазора, соответствующую $Q_{макс}$, по формуле

$$l_з = \frac{l_c}{\mu_\sim}\left(\sqrt{\frac{Q_к \, \mu_{отн.макс}}{Q_м}} - 1\right) = \frac{1,96}{400}\left(\sqrt{\frac{60 \cdot 90}{66}} - 1\right) = 0,04 \text{ см}.$$

5. По формуле (11) определим $\mu_д$ броневого сердечника при $l_з = 0,04$ *см*:

$$\mu_д = \frac{\mu_\sim}{1 + \frac{l_з}{l_c}\mu_\sim} = \frac{400}{1 + \frac{0,04}{1,96}400} = 44.$$

6. Рассчитаем ТКИ катушки, который в основном определяется $TK\mu_д$ сердечника. Поэтому в соответствии с формулой (30)

$$ТКИ = TK\mu_д = TK\mu_0 \frac{\mu_д}{\mu_0} = 2\,000 \cdot 10^{-6}\frac{44}{400} = 220 \cdot 10^{-6}.$$

Так как при выбранном зазоре ТКИ получилось больше заданного, необходимо увеличить зазор.

7. Рассчитаем значение $\mu_д$ сердечника, при котором $TK\mu_д = 100 \cdot 10^{-6}$:

$$\mu_д = \frac{\mu_0 \, TK\mu_д}{TK\mu_0} = \frac{400 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}{2\,000 \cdot 10^{-6}} = 20.$$

8. Определим величину зазора $l_з$, соответствующую $\mu_д = 20$:

$$l = \frac{(\mu_0 - \mu_д)\, l_c}{\mu_0 \, \mu_д} = \frac{(400 - 20)\,1,96}{400 \cdot 20} = 0,093 \text{ см}.$$

9. Определим необходимое число витков для получения заданной индуктивности.

Так как $l_з = \frac{0,093}{1,96} > 0,01$, то пользоваться формулой (12) нельзя.

В таких случаях приходится пользоваться экспериментальными данными. В нашем случае воспользуемся экспериментальными данными, приведенными для данного сердечника на фиг. 21. Для зазора 0,093 *см*

коэффициент $a = \frac{w}{\sqrt{L}} = 115$, отсюда

$$w = a\sqrt{L} = 115\sqrt{1,2} = 126.$$

10. По фиг. 21 определим добротность, соответствующую зазору 0,093 *см*: $Q = 220$, т. е. соответствует поставленным требованиям.

11. Определим изменение индуктивности катушки с выбранным сердечником при изменении амплитуды сигнала от 0,1 до 20 *в*. Для этого определим величины индукции, соответствующие напряжениям 0,1 и 20 *в* по формуле

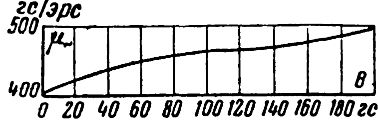
$$B = \frac{U_m \cdot 10^8}{\omega S w},$$

где U_m — напряжение, *в*;

ω — круговая частота;

S — сечение сердечника;

w — число витков;



Фиг. 29. Зависимость проницаемости оксифера-400 от индукции.

$$B_1 = \frac{0{,}1 \cdot 10^8}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 460 \cdot 10^3 \cdot 0{,}42 \cdot 126} = 0{,}065 \text{ гс};$$

$$B_2 = \frac{20 \cdot 10^8}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 460 \cdot 10^3 \cdot 0{,}42 \cdot 126} = 13 \text{ гс}.$$

12. Для определения значений проницаемости, соответствующих индукциям B_1 и B_2, необходимо иметь кривые зависимости $\mu_{\sim} = \varphi(B)$. Для оксифера-400 такая зависимость дана на фиг. 29.

Находим, что B_1 соответствует $\mu_1 = 400$, а B_2 соответсвует $\mu_2 = 425$.

Так как в нашем случае используется сердечник с зазором, определим действующую проницаемость сердечника при значении индукции B_1 и B_2:

$$\mu_{\partial 1} = \frac{\mu_1}{1 + \frac{l_з}{l_c}\mu_1} = \frac{400}{1 + \frac{0{,}093}{1{,}96} \cdot 400} = 20{,}2;$$

$$\mu_{\partial 2} = \frac{\mu_2}{1 + \frac{l_з}{l_c}\mu_2} = \frac{425}{1 + \frac{0{,}093}{1{,}96} \cdot 425} = 20{,}24;$$

отсюда

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{\mu_{\partial 2}}{\mu_{\partial 1}} = \frac{20{,}24}{20{,}2} = 1{,}002,$$

т. е. рассчитанная катушка индуктивности удовлетворяет всем заданным требованиям.

12. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ

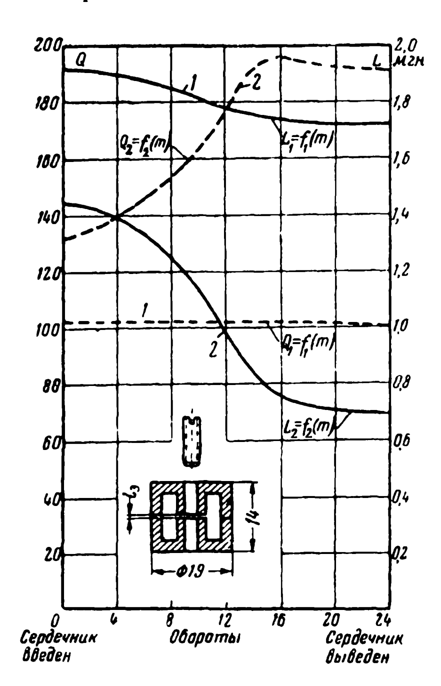
Индуктивность катушек с ферритовыми сердечниками можно регулировать за счет изменения зазора в броневых сердечниках или путем перемещения подстроечника. Кроме этих обычных методов, при использовании ферритовых сердечников возможна еще и регулировка индуктивности изменением реверсивной проницаемости.

При любом способе регулирования индуктивности катушки должны соблюдаться следующие условия:

1) индуктивность контурных катушек должна изменяться не менее $\pm 10-15\%$;

2) зависимость между индуктивностью и перемещением подстроечника должна выражаться по возможности более прямой линией (крутизна этой прямой не должна менять знак, так как иначе могут получаться двойные значения);

3) при регулировании индуктивности не должно происходить резкого изменения добротности.



Фиг. 30. Зависимость индуктивности и добротности катушки от перемещения подстроечника ⌀ 6 *мм* в броневом сердечнике из феррита с $\mu_0 = 700$ *гс/эрс*.

1 — сердечник без зазора ($l_з = 0$); *2* — сердечник с зазором ($l_з = 0,13$ *мм*).

Ввиду того, что проницаемость ферритов значительно выше проницаемости магнитодиэлектриков, обеспечение необходимого регулирования индуктивности катушек с ферритовыми сердечниками достигается достаточно легко.

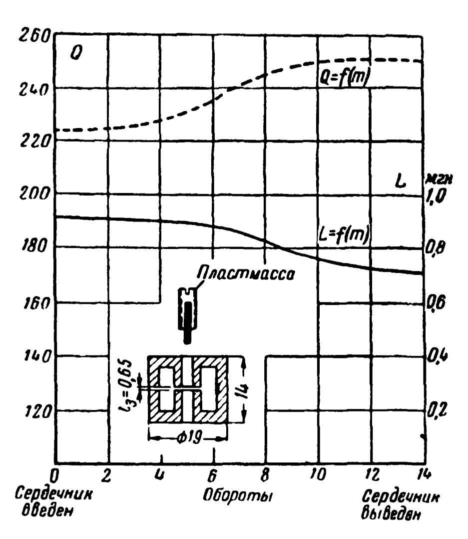
Обычно при конструировании катушек индуктивности с карбонильными броневыми сердечниками ($\mu_0 = 12$) для подстройки применяются резьбовые цилиндрические сердечники, которые входят в центральное отверстие броневого сердечника, индуктивность катушки при этом можно изменить на 15—20%.

Если применить для катушки броневой сердечник из феррита с большой проницаемостью ($\mu_0 > 100$) и цилиндрический подстроечник диаметром равным центральному отверстию в броневом сердечнике (фиг. 30), то изменение индуктивности при перемещении подстроечника будет недостаточным (порядка 10%). Объясняется это тем, что большая часть магнитного потока катушки замыкается по магнито-

проводу броневого сердечника, который благодаря большой магнитной проницаемости материала имеет малое магнитное сопротивление. Поэтому введение подстроечника не может резко изменить магнитное сопротивление магнитопровода. Если же в броневом сердечнике имеется зазор, то при введении ферритового подстроечника большого диаметра изменение индуктивности происходит неравномерно; особенно резко изменяется индуктивность, а также добротность катушки при вхождении подстроечника в зазор.

Для получения плавного изменения индуктивности и добротности катушки при перемещении подстроечника в броневом сердечнике с зазором диаметр подстроечника должен быть меньше диаметра отверстия броневого сердечника. На фиг. 31 показано, что в этом случае индуктивность катушки изменяется на 32%, а ее добротность только на 12%.

Изготовление ферритовых броневых сердечников и подстроечников с резьбой возможно, однако технология их получения достаточно сложна, поэтому наиболее рациональным в настоящее время является применение ферритовых подстроечников без резьбы (фиг. 31).



Фиг. 31. Изменение индуктивности и добротности катушки с броневым сердечником из феррита с $\mu_0 = 700$ от перемещения подстроечника диаметром 2,5 *мм*.

Рассмотрим применение цилиндрических сердечников для увеличения или регулирования индуктивности катушек.

В табл. 9 приведены значения добротности и относительной проницаемости катушек с сердечниками одинаковых размеров, изготовленных из карбонильного железа и феррита с различной проницаемостью. Ранее указывалось, что благодаря влиянию размагничивающего фактора действующая проницаемость сердечников открытой формы намного меньше, чем величина магнитной проницаемости материала

сердечника (см. фиг. 26). Поэтому замена сердечника из карбонильного железа с $\mu_0 = 12$ на сердечник тех же габаритов из феррита с $\mu_0 = 1\,000$ увеличивает индуктивность только в 1,5 раза (относительная проницаемость для ферритового сердечника равна 4,55, а для карбонильного 3). По этой же причине мала разница между индуктивностью катушек с сердечниками из феррита $\mu_0 = 1\,000$ и $\mu_0 = 90$

Таблица 9

Сравнительные данные Q и $\mu_{отн}$ для гладких цилиндрических сердечников длиной 19 и диаметром 9,3 *мм*

Материал сердечника	f = 0,5 *мггц*		f = 1,5 *мггц*		f = 5 *мггц*		f = 15 *мггц*	
	Q	$\mu_{отн}$	Q	$\mu_{отн}$	Q	$\mu_{отн}$	Q	$\mu_{отн}$
Карбонильное железо $\mu_0 = 12$	135	3	135	3,17	112	2,92	160	2,65
Феррит $\mu_0 = 20$	140	3,62	150	3,86	130	3,24	215	3,16
Феррит $\mu_0 = 90$	150	4,2	165	4,6	150	3,86	225	3,64
Феррит $\mu_0 = 400$	168	4,5	170	4,86	130	4,14	55	3,9
Феррит $\mu_0 = 700$	160	4,55	150	4,95	80	4,27	—	—
Феррит $\mu_0 = 1\,000$	160	4,55	155	4,95	85	4,27	—	—

Из табл. 9 следует, что при замене обычных карбонильных сердечников на ферритовые увеличивается не только индуктивность, но и добротность катушки. На высоких частотах нужно использовать ферриты с меньшей проницаемостью. В диапазоне частот от нескольких мегагерц до 50 *мггц* цилиндрические подстроечники из феррита с $\mu_0 = 10 \div 15$ по сравнению с карбонильными сердечниками не повышают пределы изменения индуктивности, но зато обеспечивают увеличение добротности. Например, на f=12 *мггц* при введении карбонильного подстроечника добротность катушки с Q=180 падает до Q=170, а с сердечником из оксифера-РЧ-15 добротность увеличивается до Q = 190.

Выше были указаны обычные способы изменения индуктивности катушек с ферритовыми сердечниками. Однако, используя зависимость изменения обратимой магнитной проницаемости ферритов от величины постоянного подмагничивающего поля, можно производить подстройку катушек индуктивности с помощью постоянного магнита. Если к ферритовому сердечнику приблизить постоянный магнит, то его обратимая проницаемость уменьшится. Наиболее рационально в качестве магнита использовать бариевый оксидный,

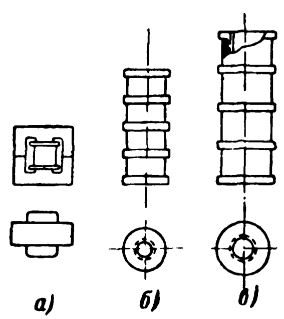
характерной особенностью которого является высокое удельное электрическое сопротивление, и поэтому при внесении его в высокочастотное поле катушки добротность последней даже несколько увеличивается.

13. ДРОССЕЛИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Феррит как материал с высоким значением проницаемости эффективно используется для сердечников дросселей высокой частоты. Обмотка таких дросселей выполнена как на замкнутых, так и разомкнутых сердечниках.

Там, где стабильность индуктивности и добротности дросселей не имеет большого значения (например, дроссели в цепях питания), можно рекомендовать замкнутые сердечники без зазора из феррита с высокой магнитной проницаемостью.

На фиг. 32 показаны три высокочастотных дросселя. Один из них *а* намотан на Ш-образном сердечнике из феррита с $\mu_0=90$ *гс/эрс*, другой *б* — на цилиндрическом сердечнике из феррита с той же магнитной проницаемостью и третий *в* — на цилиндрическом сердечнике из альсифера $\mu_0=20$ *гс/эрс*. Параметры этих дросселей приведены в табл. 10.



Фиг. 32. Дроссели с сердечниками из альсифера и феррита.

а — с Ш-образным сердечником из феррита, *б* — с цилиндрическим сердечником из феррита; *в* — с цилиндрическим сердечником из альсифера.

Таблица 10

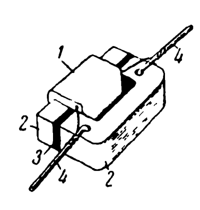
Сравнительные данные дросселей с сердечниками из феррита и альсифера

Сердечник	Материал сердечника	Индуктивность, *мкгн*	Собственная емкость C_0, *пф*	Собственная частота f_0, *мгц*	Сопротивление обмотки, *ом*	Постоянная времени (L/R), сек.	Добротность при $f=600$ *кгц*
Цилиндрический ($l=40$ *мм*, $d=7$ *мм*)	Альсифер $\mu_0=20$	200	7,3	4,16	0,4	$500\cdot10^{-6}$	30
Цилиндрический ($l=30$ *мм*, $d=5$ *мм*)	Феррит $\mu_0=90$	180	5	5,35	0,4	$450\cdot10^{-6}$	25
Ш-образный	То же	210	1,7	8,5	0,35	$600\cdot10^{-6}$	100

Из данных табл. 10 и фиг. 32 следует, что дроссель с Ш-образным сердечником из феррита имеет меньшие габариты, меньшую собственную емкость и большую добротность, чем дроссель на альсиферовом сердечнике.

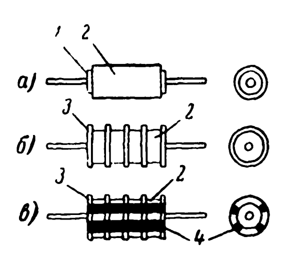
Если через обмотку высокочастотного дросселя проходит постоянная составляющая тока, то при большом ее значении ($aw_0 > 1 \div 2$ *ав/см*) сердечник делается с зазором (величина зазора может быть определена по графику фиг. 41).

На фиг. 33 показан дроссель, выполненный на О-образном сердечнике из оксифера-400 с зазором 120 *мкм*. При индуктивности этого дросселя в 2 *мгн* он содержит 240 вит-



Фиг. 33. Высокочастотный дроссель на рамочном сердечнике из феррита.

1 — катушка; 2 — ферритовый сердечник; 3 — прокладка, обеспечивающая зазор; 4 — выводные концы.



Фиг. 34. Малогабаритные дроссели с цилиндрическими сердечниками из феррита.

1 — сердечник; 2 — обмотка; 3 — каркас; 4 — экранирующие сердечники.

ков провода ПЭЛШО 0,1. Его габариты соответствуют габаритам конденсатора КСО-2.

Конструкции дросселей с открытым сердечником показаны на фиг. 34. В них используется цилиндрический сердечник из феррита с $\mu_0 = 100$ *гс/эрс* диаметром 4,5 и длиной 17 *мм*. У дросселя *а* многослойная обмотка расположена непосредственно на сердечнике, а у дросселей *б* и *в* на секционированном каркасе (четыре секции) из полистирола. Дроссель *в* снабжен четырьмя экранирующими сердечниками диаметром 2 *мм* из оксифера-400. Параметры этих дросселей приведены в табл. 11.

Надо отметить, что дроссели с открытым сердечником имеют сравнительно большие габариты и большое поле рассеяния. Однако по сравнению с дросселями на закрытых сердечниках они более просты по устройству, обладают меньшим ТКИ и большей добротностью. Кроме того, их ин-

Таблица 11

Параметры высокочастотных дросселей

Дроссель на фиг.	Число витков	Провод	Индуктивность, *мкгн*	Собственная емкость, *пф*	Собственная частота, *кгц*	Сопротивление обмотки, *ом*	Добротность при f=200 *кгц*
34, *а*	280	ПЭЛ 0,1	900	67	645	4	65
34, *б*	4×70	ПЭЛ 0,1	940	5,3	2 260	4,2	65
34, *в*	4×140	ПЭЛ 0,1	3 750	6,5	1 020	11	85

дуктивность меньше зависит от подмагничивающего тока и амплитуды подводимого напряжения.

Наилучшей формой сердечника для высокочастотного дросселя на частотах до нескольких мегагерц является замкнутый магнитопровод с оптимальным зазором, подобранным по заданному значению добротности, ТКИ и т. д.

Из приведенных выше данных следует, что использование ферритовых сердечников для высокочастотных дросселей позволяет резко сократить их габариты. Получить подобные габариты дросселей при применении сердечников из карбонильного железа или альсифера не представляется возможным.

14. ФИЛЬТРЫ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ

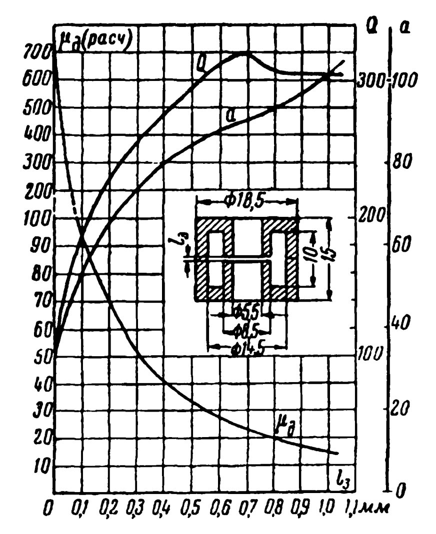
Прежде чем перейти к описанию конкретных конструкций фильтров промежуточной частоты, рассмотрим вначале некоторые особенности катушек с ферритовыми сердечниками.

Добротность. Катушки индуктивности с ферритовыми сердечниками имеют бóльшую добротность, чем катушки с карбонильными сердечниками тех же габаритов. Изготовить катушку индуктивности с сердечником из феррита, имеющую добротность порядка 500—625 на частоте 100 *кгц*, не представляет затруднений.

Наибольшую добротность удается получить при применении броневых сердечников с оптимальным зазором. Например, для сердечника, показанного на фиг. 35, наибольшая добротность, равная 320 на частоте 460 *кгц*, получается при зазоре 0,7 *мм*.

Зависимость добротности катушек с цилиндрическими

сердечниками различной проницаемости от частоты показана на фиг. 36.

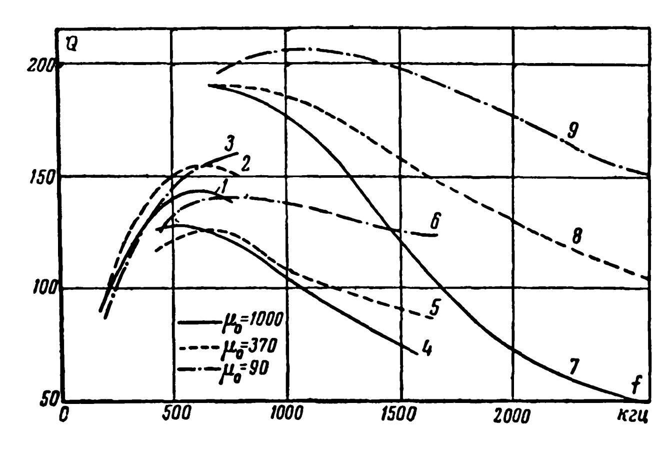


Фиг. 35. Кривые изменения $\mu_д$, Q и коэффициента a на $f = 460$ *кгц* в зависимости от величины зазора для броневого сердечника из феррита с $\mu_0 = 700$ *гс/эрс* ($w = 50$ витков, ЛЭШО $15 \times 0{,}05$).

При использовании ферритов с проницаемостью 10—20 *гс/эрс* можно изготовить катушки добротностью 200 на частотах 20—50 *мггц*.

Недостатком катушек с ферритовыми сердечниками замкнутой формы и с малым зазором по сравнению с катушками, имеющими сердечники из карбонильного железа, является некоторая зависимость добротности от величины индукции, определяемой амплитудой подводимого напряжения (табл. 12).

Из данных в табл. 12 следует, что при неболь-



Фиг. 36. Зависимость добротности катушек с цилиндрическими сердечниками ($l = 35$ и $d = 5{,}5$ *мм*) из феррита от частоты.

1, 2 и *3* — при w = 230 витков ПЭЛ 0,1: *4, 5* и *6* — при w = 129 витков ПЭЛШО 0,15, *7, 8, 9*— при w= 82 витка ЛЭШО 10×0,07.

Таблица 12

Зависимость добротности катушки с броневым сердечником (наружный диаметр 18 *мм*) от величины индукции (напряжения на катушке)

Материал сердечника	Высота сердечника, *мм*	Зазор, *мм*	Напряжение на катушке, *в*	Магнитная индукция, *гс*	Добротность при $f=460$ *кгц*	$\mu_{отн}$
Феррит $\mu_0 = 1\,000$	14	0,13	3,6	10	170	53
			18,5	51	135	
То же	14	0,65	4,5	13	205	17
			18,5	53	180	
То же $\mu_0 = 700$	14	0,13	3,9	10	180	32,5
			17	43	145	
То же	14	0,65	4,8	13,5	230	13
			17,5	49	210	
То же	10	0,13	3,5	9	164	25
			17	44	160	
То же $\mu_0 = 20$	14	0	3	6,8	135	5
			18,5	37	90	
Карбонильное железо $\mu_0 = 12$	10	0	4	9	192	4
			20	40	190	

шом зазоре в сердечнике из феррита (порядка 0,15 *мм*) зависимость добротности катушки от индукции (напряжения на катушке) достаточно велика (при изменении амплитуды напряжения от 3,6 до 18,5 *в* добротность падает с 170 до 135). При большом же зазоре (0,65 *мм*) изменение добротности незначительно (с 230 до 210). Для катушек с карбониль-

ными сердечниками добротность при том же примерно изменении индукции остается постоянной.

Стабильность добротности при изменении индукции может быть повышена, если увеличить зазор. Из той же табл. 12 следует, что относительная проницаемость для катушек с ферритовыми сердечниками, равная 13—53, значительно больше, чем для катушек с сердечником из карбонильного железа, имеющих $\mu_{отн} = 4$. При увеличении зазора в сердечнике из феррита до получения $\mu_{отн}=4$ может быть достигнута стабильность добротности катушек с ферритами от изменения индукции того же порядка, что и для катушек с карбонильными сердечниками.

Явление понижения добротности при возрастании индукции (амплитуды напряжения сигнала) может быть использовано в радиоприемнике. Известно, что при приеме громких станций желательно расширение полосы пропускания. Если в последнем каскаде усилителя промежуточной частоты применить одиночный контур с катушкой, имеющей ферритовый сердечник с малым зазором, то расширение полосы пропускания в приемнике будет происходить автоматически.

В катушках с цилиндрическими ферритовыми сердечниками изменение добротности при изменении индукции, соответствующей напряжению на катушке от 0 до 20 *в*, в диапазоне длинных и средних волн практически не обнаруживается.

Влияние напряжения сигнала на индуктивность катушки. Ранее указывалось, что динамическая проницаемость зависит от величины индукции в сердечнике. Известно, что индукция прямо пропорциональна напряжению сигнала, подводимого к обмотке катушки, и обратно пропорциональна сечению сердечника, числу витков и частоте сигнала.

Если для катушки используется магнитопровод замкнутой формы (например, броневого типа без зазора) из феррита с высокой проницаемостью, то влияние подводимого к обмотке напряжения на индуктивность катушки будет наибольшим.

При введении в сердечник зазора магнитная индукция в нем практически не изменится, так как она определяется приложенным к катушке напряжением. Изменение проницаемости материала сердечника от изменения индукции будет происходить в этом случае так же, как и в сердечнике без зазора. Однако влияние на индуктивность катушки

изменения проницаемости материала сердечника при наличии в нем зазора будет меньшим, чем для катушки с сердечником без зазора. Объясняется это тем, что индуктивность катушки с сердечником замкнутой формы прямо пропорциональна величине проницаемости материала сердечника, а для сердечника с зазором величина индуктивности прямо пропорциональна действующей магнитной проницаемости сердечника, которая согласно формуле (11) изменяется в меньшей степени, чем изменение проницаемости материала сердечника.

В табл. 13 показано изменение индуктивности катушек с сердечниками из феррита и карбонильного железа при разных напряжениях сигнала (изменения величины индукции). Например, при возрастании напряжения сигнала от 0,75 до 13 *в* индуктивность катушки с ферритовым сердечником с малым зазором ($l_з = 0{,}13$ *мм*) изменяется на 0,5%, а при увеличении зазора в сердечнике до 0,65 *мм* изменение индуктивности не превышает 0,05%, что даже несколько лучше стабильности индуктивности катушки с карбонильным сердечником. Для катушек с цилиндрическими сердечниками зависимость индуктивности от величины индукции значительно меньшая, чем для броневых сердечников.

Необходимо отметить, что влияние подводимого к катушке напряжения на ее индуктивность должно определяться на самой низкой частоте рабочего диапазона частот, где индукция больше, чем на высокочастотном конце диапазона, так как ее величина обратно пропорциональна частоте.

Габариты и максимальная индуктивность. Из изложенного выше следует, что при необходимости получения очень стабильных параметров габариты катушек с ферритовыми сердечниками становятся почти такими же, как и габариты катушек с карбонильными сердечниками. В том же случае, когда можно допустить некоторое снижение тех или иных технических требований, габариты катушек с ферритовыми сердечниками могут быть значительно меньше соответствующих катушек с карбонильными сердечниками.

В табл. 14 приведены возможные максимальные индуктивности катушек с броневыми ферритовыми сердечниками без зазора.

Влияние экрана. В ферритовых броневых сердечниках без зазора или с зазором только в среднем стержне влияние экрана на добротность и индуктивность практически отсутствует, что объясняется малым магнитным рассеянием

Таблица 13

Влияние величины переменной индукции на индуктивность катушки с броневым сердечником (наружный диаметр 18, высота 14 *мм*)

Материал и проницаемость	Зазор, *мм*	Число витков	Частота, *кгц*	Напряжение на катушке, *в*	Индукция, *гс*	Изменение индуктивности, %
Феррит $\mu_0 = 700$	0,13	50	460	0,75	2	0
				3,5	10	0,03
				8,9	25	0,44
				13	36	0,5
То же	0,65	50	460	0,75	2	0
				1,05	2,9	0
				1,35	3,8	0,01
				7	20	0,04
				13	36	0,05
Карбонильное железо $\mu_0 = 12$	0	70	460	4,2	9	0
				6,4	13	0,023
				13	26	0,08

за счет большой проницаемости ферритов. Дополнительный магнитный экран в этом случае не нужен. Размеры электростатического экрана, когда он необходим, должны выбираться только из конструктивных соображений (зазор между экраном и сердечником может быть порядка 1 *мм*).

Для катушек с ферритовыми сердечниками открытого типа (например, цилиндрическими) влияние экрана такое же, как и с сердечниками из карбонильного железа. Однако, используя ферриты в качестве магнитных экранов между катушкой с цилиндрическим сердечником и экранирующим корпусом, можно уменьшить влияние последнего на добротность катушки.

Таблица 14

Катушки с броневыми сердечниками из феррита

Размеры сердечника		Число витков (провод ПЭЛ 0,1)	Начальная проницаемость феррита, *гс/эрс*	Индуктивность, *мгн*
наружный диаметр, *мм*	высота, *мм*			
10	10	200	2 000 1 000 700 400 100	36 18 12 6,5 1,5
18	14	1 000	2 000 1 000 700 400 100	2 000 1 000 700 400 100
20	18	1 300	2 000 1 000 700 400 100	3 300 1 700 1 200 650 160

Примечание. Добротность и температурный коэффициент индуктивности катушек с броневыми сердечниками без зазора того же порядка, что добротность и температурный коэффициент проницаемости материала сердечника.

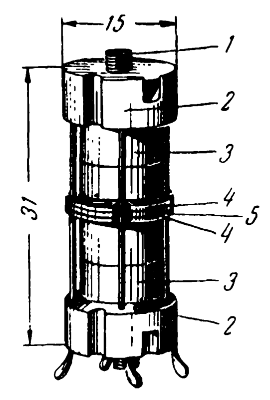
Конструкции фильтров промежуточной частоты. Более высокая добротность катушек с сердечниками из феррита, чем добротность катушек с карбонильными сердечниками, позволяет сконструировать фильтры промежуточной частоты с лучшими резонансными характеристиками при тех же габаритах фильтра или уменьшить габариты при сохранении электрических параметров.

При использовании броневых сердечников из феррита с высокой магнитной проницаемостью без зазора или с зазором только в среднем стержне затруднительно получить необходимую индуктивную связь между двумя контурами фильтра. Если взять, например, два броневых сердечника и поместить их один на другой, то коэффициент связи оказывается значительно меньше критического. В этом случае рекомендуется применить емкостную связь.

На фиг. 37 показан малогабаритный фильтр промежуточной частоты (460 *кгц*) для схемы с емкостной связью между его контурами. В контурах этого фильтра использованы специальные конденсаторы плоского типа. Каждая

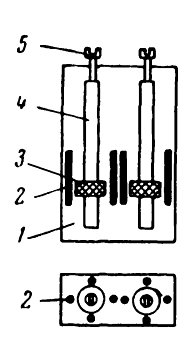
катушка фильтра имеет броневой сердечник диаметром 10 и высотой 9 *мм* из феррита с $\mu_0 = 600$. При оптимальном зазоре сердечника добротность катушки равна 130—150, относительная проницаемость 15—20, температурный коэффициент индуктивности $+700 \cdot 10^{-6}$.

Габаритный объем фильтра промежуточной частоты, изображенного на фиг. 37, равен 6 *см*³. Получить такие же малые габариты с сердечниками из карбонильного железа нельзя из-за меньшей относительной проницаемости и силь-



Фиг. 37. Конструкция фильтра промежуточной частоты.

1 — резьбовая пробка с подстроечником; *2* - пластмассовая колодка; *3* — катушки в броневом сердечнике из феррита; *4* — контурные конденсаторы; *5* — прокладка.



Фиг. 38. Конструкция фильтра промежуточной частоты.

1 — кожух фильтра; *2* — ферритовые экранирующие стержни; *3* — катушка; *4* — гильза с ферритовым подстроечником; *5* — винт.

ного влияния экрана на добротность. Например, объем фильтров промежуточной частоты приемников «Балтика» и «Родина» равен соответственно 170 и 45 *см*³.

Недостатком конструкции изображенного на фиг. 37 фильтра является то, что зазор в среднем стержне сердечника должен выдерживаться с большой точностью ($l_з = 0{,}5 \pm 0{,}1$ *мм*), что несколько затруднительно при массовом производстве.

Применение индуктивной связи в фильтре промежуточной частоты возможно при использовании сердечников открытой формы, например цилиндрических. На фиг. 38 показан двухконтурный фильтр на частоту 465 *кгц* размерами $38 \times 25 \times 11$ *мм*. Добротность катушек в экране равна 80 при емкости контура 100 *пф*. Каждая катушка намотана на цилиндрической картонной гильзе проводом ЛЭШО $2 \times$

$\times$0,06 *мм*. Подстройка индуктивности осуществляется цилиндрическим ферритовым стержнем, передвигаемым внутри гильзы при помощи металлического винта. Вокруг катушки помещены экранирующие ферритовые сердечники с $\mu_0 = 600$ диаметром 2 и длиной 12 *мм*. Большая часть магнитного поля рассеяния катушки замыкается в экранирующих сердечниках, благодаря чему резко уменьшается влияние экрана малых размеров на добротность катушки. Малый коэффициент индуктивной связи (порядка 1%) между первым и вторым контурами фильтра промежуточной частоты обеспечивается также за счет экранирующих ферритовых сердечников. Поток рассеяния катушки первого контура замыкается в ближайшем к нему ферритовом сердечнике и значительно ослабляется в месте расположения катушки второго контура. При необходимости увеличения коэффициента индуктивной связи необходимо укоротить длину экранирующих сердечников, находящихся между катушками.

Из приведенных сравнений катушек с ферритовыми и карбонильными сердечниками можно сделать вывод, что замена карбонильных сердечников на ферритовые во многих случаях обеспечивает лучшие параметры. Особенно выгодны броневые сердечники с оптимальным зазором, подобранным по заданным величинам добротности, температурного коэффициента и т. д., так как в этом случае, кроме сокращения габаритов самого ферритового сердечника, можно уменьшить и размеры экрана. В тех же случаях, когда в фильтрах промежуточной частоты для радиовещательных приемников можно ограничиться добротностью в 80—130 и не преследовать существенного сокращения габаритов контура, рационально применение и сердечников открытой формы, например цилиндрических сердечников.

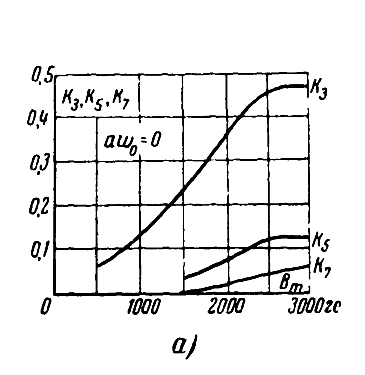
ГЛАВА ТРЕТЬЯ

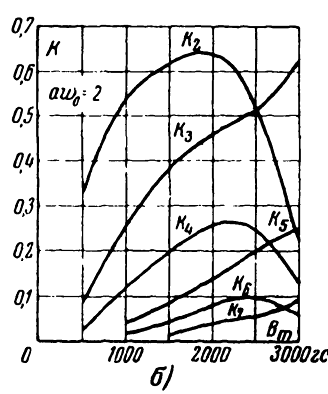
ТРАНСФОРМАТОРЫ С ФЕРРИТОВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

15. ТРАНСФОРМАТОРЫ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Начальная магнитная проницаемость μ_0 трансформаторной стали, применяемой для сердечников трансформаторов низкой частоты, равна 400 *гс/эрс*. Ферриты же имеют значение $\mu_0 = 1\,000 \div 2\,000$ *гс/эрс*. Кроме того, их легко отпрессовать в сердечники любой формы (например, Ш-образной).

Высокое удельное сопротивление ферритов обеспечивает малые потери на вихревые токи в сердечнике монолитной формы. Сборка трансформаторов с Ш-образными ферритовыми сердечниками производится быстрее, чем из тонких пластин. Благодаря тому, что ферриты легко шлифуются, воздушный зазор в месте стыка двух Ш-образных сердечников может быть доведен до минимума, что уменьшает проницаемость сборного сердечника только на 10—15% по сравнению с проницаемостью материала.





Фиг. 39. Зависимость коэффициентов гармоник тока от переменной составляющей индукции и постоянного подмагничивания для оксифера-1000.

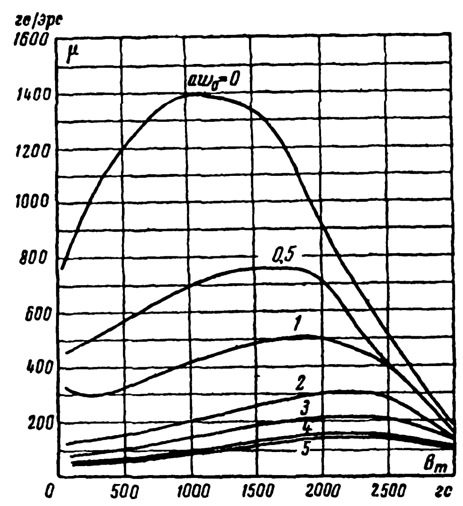
а — при $aw_0 = 0$; *б* — при $aw_0 = 2$ *ав/см*.

Видимо, на первый взгляд нет причин, почему бы не использовать ферритовые сердечники для всех типов трансформаторов низкой частоты. Однако необходимо учесть, что индукция насыщения ферритов равна примерно 3 000 *гс*, а для трансформаторной стали она более 18 000 *гс*. Небольшая величина индукции насыщения приводит при использовании ферритов для сердечников выходных трансформаторов мощностью более 50 *мвт* к нелинейным искажениям при сильных сигналах.

Для ферритов, как и для большинства магнитных материалов, зависимость индукции от намагничивающего поля нелинейна. Поэтому при подведении к обмотке трансформатора с сердечником из магнитного материала синусоидального напряжения ток намагничивания получается несинусоидальным, т. е. содержит высшие гармонические составляющие, которые проходят через источник э. д. с. и создают на его зажимах падение напряжения высших гармоник. В ре-

зультате этого как на первичной, так и на вторичной обмотках трансформатора появляется напряжение высших гармоник, а следовательно, возникают нелинейные искажения.

На фиг. 39 приведены зависимости коэффициентов гармоник тока K от переменной составляющей индукции $B_{\sim}$ и постоянного подмагничивания aw_0 для оксифера-1000. Из кривых коэффициентов гармоник тока видно, что при значениях переменной индукции выше 500—1 000 *гс* резко увеличиваются нелинейные искажения. Например, для ок-



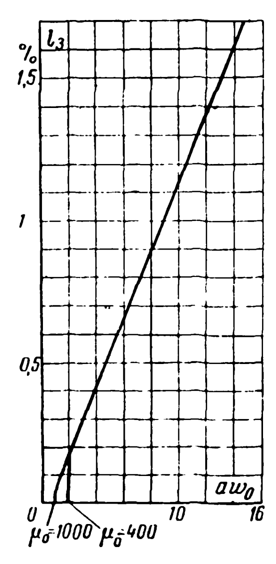
Фиг. 40. Зависимость динамической проницаемости оксифера-1000 от индукции и постоянного подмагничивания.

сифера-1000 коэффициент третьей гармоники $K_3 = 0{,}4$ при $B_{\sim} = 2\,300$ *гс*, тогда как для стали марки ЭЧА при той же индукции $K_3 = 0{,}1$.

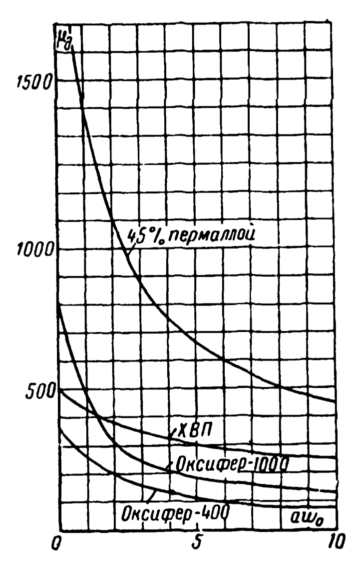
Если aw_0 не равны нулю, то в искаженной форме кривой тока намагничивания появляются и четные гармоники. Кроме того, при наличии постоянной составляющей тока в одной из обмоток индуктивность трансформатора с ферритовым сердечником резко изменится из-за уменьшения проницаемости (фиг. 40). В этом случае введение оптимального зазора позволяет увеличить индуктивность трансформатора, так как зазор снижает постоянную составляющую индукции в сердечнике, отчего увеличивается реверсивная проницаемость; при небольших зазорах уменьшение магнитного

сопротивления материла сердечника снижает полное сопротивление магнитопровода сильнее, чем его увеличивает введение зазора.

На фиг. 41 приведен график наивыгоднейших зазоров при малых переменных индукциях для оксифера-400 и оксифера-1000. Из графика следует, что для оксифера-1000 за-



Фиг. 41. Кривая наивыгоднейших зазоров при малых индукциях для оксифера-400 и оксифера-1000.



Фиг. 42. Средние кривые действующей начальной проницаемости на $f = 50$ *гц* с учетом наивыгоднейшего зазора для основных магнитно-мягких материалов.

зор для увеличения индуктивности необходим только при $aw_0 > 1$ *ав/см*, а для оксифера-400 при $aw_0 > 2$ *ав/см*.

Из приведенных на фиг. 42 средних кривых действующей начальной магнитной проницаемости с учетом наивыгоднейшего зазора для основных магнитно-мягких материалов ясно, что применение ферритов для трансформаторов низкой частоты при наличии подмагничивания порядка нескольких ампер-витков на сантиметр менее выгодно, чем применение 45%-ного пермаллоя или даже обычных трансформаторных сталей; однако при $aw_0 \leq 1$ *ав/см* выгоднее применять сердечники из феррита, чем, например, из стали марки ХВП.

Использование ферритовых сердечников из материала

с $\mu_0 = 1\,000 \div 2\,000$ *гс/эрс* для трансформаторов низкой частоты целесообразно только в ограниченной области, например для трансформаторов без подмагничивающего тока или с очень малым подмагничиванием, если при этом переменная индукция при максимальном сигнале на самой низкой частоте не превышает 500—1 000 *гс* (входные трансформаторы без подмагничивания, а также трансформаторы для устройств с полупроводниковыми триодами).

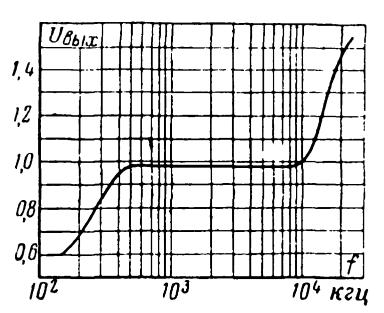
16. ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ

Из-за низкой индукции насыщения, как это ясно из предыдущего, ферритовые сердечники нельзя применять для силовых трансформаторов, работающих от сети переменного тока с частотой 50 *гц*; габариты силовых трансформаторов в этом случае будут значительно больше, чем у трансформаторов с сердечниками из листовых магнитных материалов. Однако при более высокой частоте питания трансформаторы с ферритовыми сердечниками могут оказаться более выгодными (например, при закалке токами повышенной частоты).

17. ТРАНСФОРМАТОРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ

Из известных магнитных материалов ферриты лучше других удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалу для сердечников высокочастотных трансформаторов.

Например, для согласования широкополосного усилителя с коаксиальным кабелем был применен трансформатор с тороидальным сердечником диаметром 35 и толщиной 8 *мм* из феррита с μ_0 =500 *гс/эрс*. Частотная характеристика оконечного каскада, собранного на лампе 6П3С, при работе на коаксиальный кабель РК-3, характеристическое сопротивление которого равно 75 *ом*, изображена на фиг. 43. Из этой характеристики видно, что в полосе частот от 300 *кгц* до 15 *мггц* неравномерность частотной характеристики равна ±3 *дб*. На частотах ниже 300 *кгц* частотная характеристика имеет завал, который объясняется шунтированием нагрузки индуктивным сопротивлением первичной обмотки трансформатора, а на частотах выше 10 *мггц* она имеет



Фиг. 43. Частотная характеристика оконечного каскада усилителя.

подъем, вызванный резонансом индуктивности рассеяния и собственной емкости трансформатора. В данном частном случае подъем частотной характеристики использован для компенсации потерь на более высоких частотах в коаксиальном кабеле.

Основными преимуществами выходных трансформаторов с ферритовыми сердечниками являются малые габариты и хорошая магнитная экранировка. Для уменьшения потерь и устранения влияния подмагничивающего тока рекомендуется в среднем стержне Ш-образных сердечников предусмотреть зазор.

Ферриты могут быть успешно использованы и в импульсных трансформаторах, предназначенных для передачи импульсов длительностью менее 0,1 мксек. Например, для блокинг-генератора с длительностью импульса 0,06 сек. на лампе 6АК5 был применен трансформатор с ферритовым тороидальным сердечником диаметром 22 и толщиной 5 *мм*. На сердечник было намотано 13 витков для анодной, 12 витков для сеточной и шесть витков для выходной обмоток. Анодная и сеточная обмотки намотаны двумя проводами в параллель на одной стороне сердечника, а выходная обмотка на другой стороне.

Особенно эффективно использование ферритовых сердечников для телевизионных трансформаторов. Например, строчные трансформаторы с ферритовыми сердечниками имеют меньшие габариты (на 30%) и обеспечивают лучшую линейность развертки (за счет уменьшения индуктивности рассеяния и собственной емкости), чем трансформаторы с сердечниками, собранными из тонких пластин трансформаторной стали толщиной 0,1 *мм*. Трансформаторы с ферритовыми сердечниками имеют меньшие потери и большую действующую проницаемость сердечника.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ВАРИОМЕТРЫ С ФЕРРИТОВЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

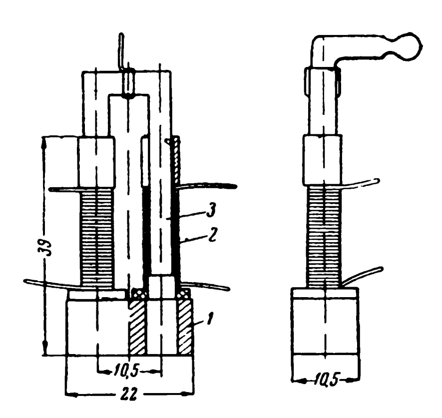
18. ФЕРРОВАРИОМЕТРЫ

Ферритовые сердечники, как и магнитодиэлектрики, могут быть использованы для настройки колебательных контуров в вариометрах, где изменение индуктивности достигается передвижением сердечника относительно неподвиж-

ной катушки. Условимся называть такие устройства ферровариометрами.

Применяемые в настоящее время ферровариометры для настройки контуров радиоаппаратуры позволяют получить изменение индуктивности не более чем в 10 раз. В качестве материала сердечника обычно применяется альсифер с начальной магнитной проницаемостью 20 *гс/эрс*.

Применение в обычных конструкциях ферровариометра цилиндрических сердечников из феррита с $\mu_0 = 400 - 2\,000$ *гс/эрс* не дает очень большого изменения индуктивности. Например, замена альсиферового сердечника диаметром 6,7 и длиной 40 *мм* в вариометре автомобильного при-



Фиг. 44. Конструкция ферровариометра.
1 — ярмо из феррита; *2* — катушка; *3* — П-образный сердечник из феррита.

емника на сердечник тех же размеров из феррита с $\mu_0 = 1\,000$ *гс/эрс* дает изменение индуктивности в 35 раз (с альсиферовым сердечником в 10 раз). Однако при использовании феррита в обычной конструкции ферровариометра с изменением индуктивности в 10 раз длина сердечника может быть уменьшена, а следовательно, и уменьшены общие габариты ферровариометра. С другой стороны, можно увеличить толщину стенок каркаса, на который наматывается катушка ферровариометра. Это удобно технологически и, кроме того, позволяет увеличить добротность катушки.

Если требуется получить изменение индуктивности больше, чем в 35 раз, необходимо использовать сердечник замкнутой формы с высоким значением начальной прони-

цаемости. На фиг. 44 показан общий вид ферровариометра с П-образным сердечником из феррита с $\mu_0 = 1\,000$ *гс/эрс*, обеспечивающим изменение индуктивности в 115 раз. Для плавного изменения индуктивности при перемещении сердечника применены две катушки, в которые входит П-образный сердечник. Последний при максимальной величине индуктивности входит с зазором в замыкающее магнитный поток ярмо, имеющее большую толщину.

Использование ферровариометра с изменением индуктивности в 100—120 раз в детекторном приемнике или в приемнике прямого усиления с полупроводниковыми триодами позволяет избавиться от переключателя диапазонов и уменьшить габариты приемника. При использовании таких ферровариометров в супергетеродинных приемниках сопряжение настройки может быть осуществлено либо специальной намоткой катушек, либо особой формой сердечника в одном из контуров.

19. МАГНИТНЫЕ ВАРИОМЕТРЫ

Используя зависимость обратимой проницаемости от напряженности постоянного магнитного поля, можно создать новые приборы для настройки колебательных контуров, которые в отличие от ферровариометров условимся называть **магнитными вариометрами**.

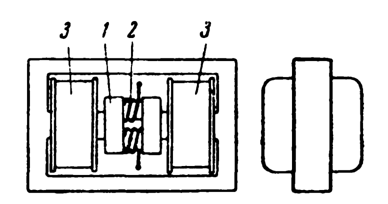
Для получения широких пределов изменения индуктивности катушки с магнитным сердечником необходим материал с высокой начальной магнитной проницаемостью, который насыщался бы до минимального значения обратимой проницаемости при сравнительно небольшой напряженности постоянного магнитного поля. Кроме того, потери на радиочастотах в этом материале должны быть малы.

Особенно резкое изменение обратимой проницаемости наблюдается у сплавов типа пермаллой, но из-за больших потерь на высоких частотах его нельзя применить для сердечников магнитного вариометра. Карбонильное железо почти не меняет свою проницаемость даже в сильных магнитных полях. Небольшое изменение обратимой проницаемости заметно у альсифера. Наиболее подходящими материалами для магнитного вариометра являются ферриты, у которых сильно изменяется обратимая проницаемость и малы потери на высокой частоте.

Известны два способа магнитной настройки: электрический и механический. При первом способе изменение индук-

тивности катушки с сердечником из феррита осуществляется током, проходящим через обмотку высокочастотной катушки или электромагнита, а при втором — передвижением постоянного магнита относительно неподвижной высокочастотной катушки с ферритовым сердечником. В обоих случаях происходит изменение подмагничивающего поля, что вызывает изменение величины обратимой проницаемости феррита.

Для того чтобы изменение индуктивности было наибольшим при данном изменении поля, необходимо применять сердечник замкнутой формы и выбирать проницаемость сердечника как можно более высокой. Ограничением в выборе материала сердечника и его формы является необходимость обеспечения заданной величины добротности в нужном диапазоне частот. Поэтому при переходе на диапазон более высоких частот приходится применять ферриты с более низкой проницаемостью и отказываться от замкнутой формы сердечника за счет уменьшения изменения индуктивности магнитного вариометра.



Фиг. 45. Агрегат дистанционной настройки.

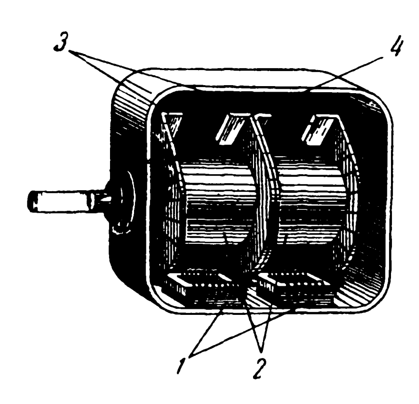
1 — ферритовый стержневый сердечник; 2 — высокочастотная катушка; 3 — катушки электромагнита.

При электрическом способе магнитной настройки величина тока через подмагничивающую катушку может регулироваться от руки при помощи реостата или автоматически, например, специальными электронными схемами. При отсутствии тока или малой его величине индуктивность катушки магнитного вариометра будет наибольшая, при увеличении же тока подмагничивания усилится постоянное магнитное поле, вследствие чего уменьшится значение обратимой магнитной проницаемости и, следовательно, индуктивность станет меньше.

На фиг. 45 показан агрегат дистанционной настройки антенны радиопередатчика, состоящий из ферритового сердечника рамочной формы, высокочастотной катушки и электромагнита с сердечником из стали Армко и двумя катушками, имеющими по 2 000 витков. При использовании ферритового сердечника с $\mu_0 = 25$ *гс/эрс* на частоте 3 *мггц* и при изменении тока от 0 до 150 *ма* индуктивность изменяется в 2 раза при добротности 100—120.

Необходимо отметить, что в магнитных вариометрах наблюдается явление гистерезиса, вызывающее несовпадение настроек при возвращении к прежнему значению тока. Явление гистерезиса неизбежно из-за наличия большой коэрцитивной силы у ферритов, а также у сердечника электромагнита.

В магнитном вариометре для автоподстройки на высокой частоте (100—200 *мггц*) в качестве сердечника высокочастотной катушки используется феррит с $\mu_0 = 10—15$ цилиндрической или трубчатой формы. Для уменьшения потерь, вносимых за счет сердечника электромагнита, последний также изготовляется из феррита с высокой проницаемостью. Например, с контурной катушкой, имеющей восемь витков, на сердечнике трубчатой формы из феррита с $\mu_0 = 10$ *гс/эрс*, при изменении тока подмагничивания в катушке электромагнита от 0 до 45 *ма* частота генератора изменялась линейно от 118 до 150 *мггц*. Эта высокочастотная катушка помещалась между полюсами электромагнита, сердечник которого из феррита с $\mu_0 = 800$ *гс/эрс* имел П-образную форму, а катушка электромагнита содержала 5 000 витков.



Фиг. 46. Сдвоенный агрегат магнитной настройки.

1 — катушки на рамочных сердечниках из феррита; *2* — магниты; *3* и *4* — полюсные наконечники.

Достоинства электрического способа магнитной настройки заключаются в возможности управления на расстоянии (орган управления можно вынести в любое место устройства и вне его) и в неподвижности магнитной системы. Недостатками же этого способа являются расход тока от источников питания, необходимость иметь высококачественный реостат и трудность сопряжения нескольких контуров.

Магнитный вариометр с механическим способом настройки не требует расхода электрического тока и позволяет легко осуществить сопряжение нескольких контуров. В основе устройства такого вариометра лежит принцип изменения магнитного потока, пронизывающего катушку с ферритовым сердечником, путем изменения положения магнита.

На фиг. 46 представлена конструкция сдвоенного агрега-

та магнитной настройки. Каждая секция агрегата состоит из цилиндрического магнита, полюсных наконечников специальной формы и катушки на ферритовом сердечнике. В нулевом положении магнит шунтируется через полюсные наконечники на стальной корпус и магнитный поток не пронизывает ферритовый сердечник катушки; в этом положении индуктивность максимальна. При повороте оси агрегата магнитной настройки от 0 до 250° полюсные наконечники приближаются к катушке с ферритовым сердечником, постепенно увеличивая магнитный поток, который пронизывает сердечник катушки; при повороте на 250° магнитный поток достигает максимума, а индуктивность катушки падает до минимального ее значения.

Для устранения влияния поля магнита одной секции на ферритовый сердечник другой соседней секции, магниты устанавливаются на общей латунной оси одноименными полюсами друг к другу.

Агрегат настройки имеет четыре полюсных наконечника, два из которых сплошные (толщиной 1 *мм*), а два других (толщиной 0,5 *мм*) разрезаны на ряд секций для обеспечения сопряжения контуров. Сопряжение производится путем подгибания секций полюсного наконечника. Если при данном угле поворота оси магнитного вариометра необходимо уменьшить индуктивность гетеродинного контура, то та из секций, которая в данный момент находится против ферритового сердечника, подгибается для уменьшения зазора; при меньшем зазоре между полюсным наконечником и ферритовым сердечником увеличится магнитный поток и уменьшится индуктивность катушки. Форма полюсных наконечников выбрана такой, что она обеспечивает наиболее равномерное изменение проницаемости с поворотом магнитной системы.

Для получения большого изменения индуктивности ферритовый сердечник магнитного вариометра фиг. 46 должен иметь замкнутую форму и катушка должна быть намотана непосредственно на сердечник почти по всей его длине. При использовании сердечника рамочной формы из оксифера-600 и магнитов объемом в 6 *см*^{3} удается получить изменение индуктивности в 100—120 раз при добротности 50—80 в диапазоне длинных и средних волн. Таким образом, описанный магнитный вариометр позволяет осуществить настройку в диапазоне длинных и средних волн без использования переключателя диапазонов.

Общим недостатком всех магнитных систем настройки

является значительная зависимость индуктивности катушек магнитных вариометров от температуры, что в основном объясняется большим ТК μ_r ферритов.

При механическом способе магнитной настройки ТКИ получается значительно большим, чем при электрическом способе. Объясняется это тем, что неизбежный зазор между полюсными наконечниками и ферритовым сердечником сохраняет почти неизменной величину постоянной индукции, что приводит к более сильному изменению величины μ_r при изменении температуры. Например, ТКИ магнитного вариометра фиг. 46 равен от плюс 5 000 до минус $20\,000 \cdot 10^{-6}$.

Использование магнитных вариометров в качестве агрегатов настройки будет более широким при разработке новых ферритов с малым значением ТК μ_r и небольшими потерями на высоких частотах.

ГЛАВА ПЯТАЯ

МАГНИТНАЯ АНТЕННА

Обычная рамочная антенна занимает большую площадь в радиоприемнике. В последнее время появились рамочные антенны с ферромагнитным сердечником, получившие название магнитных антенн.

Основным элементом магнитной антенны является катушка, надетая на стержневой сердечник из альсифера или феррита. С сердечником из альсифера эффективность антенны получается меньше и габариты больше (вследствие сравнительно низкого значения магнитной проницаемости), чем с сердечником из феррита.

Сердечник магнитной антенны, будучи помещен в магнитное поле, концентрирует магнитные силовые линии тем сильней, чем выше проницаемость материала, из которого он изготовлен.

Рамочная антенна без сердечника в сочетании с конденсатором переменной емкости образует входной контур приемника, напряжение на котором (в вольтах)

$$U = Qe = \omega BSwQ \cdot 10^{-8}, \qquad (32)$$

где Q — добротность контура;
e — э. д. с., наведенная в рамке;
w — число витков;
S — площадь рамки, $см^2$;

B — индукция в воздухе, обусловленная полем передатчика, *гс*.

При введении в рамку ферромагнитного сердечника ее эффективность увеличивается, так как последний концентрирует магнитный поток, пронизывающий рамку. Плотность потока будет максимальна в середине сердечника. Обозначим индукцию здесь через $\mu_д B$, где $\mu_д$ — действующая проницаемость сердечника, зависящая от отношения его длины к диаметру и проницаемости материала (см. фиг. 26). Тогда при использовании рамочной антенны с сердечником (магнитной антенны) напряжение на контуре

$$U = \omega\mu_д BSwQ \cdot 10^{-8}. \qquad (33)$$

Из сравнения формул (32) и (33) следует, что напряжение на контуре при введении сердечника увеличивается в $\mu_д$ раз. Это справедливо при сохранении значений S и w неизменными. На самом же деле для сохранения постоянного значения индуктивности (для возможности настройки на заданную частоту) необходимо уменьшить S или w. Следовательно, при использовании сердечника с большой проницаемостью размеры рамочной антенны могут быть уменьшены.

Наводимая в рамке или магнитной антенне э. д. с.

$$e = Eh_д, \qquad (34)$$

где E — напряженность поля;

$h_д$ — действующая высота антенны.

Подставив значение e из формулы (34) в формулу (32), получим:

$$U = Eh_д Q. \qquad (35)$$

Таким образом, эффективность магнитной антенны или рамки зависит, в основном, от произведения действующей высоты антенны на добротность контура.

Действующая высота магнитной антенны несколько меньше действующей высоты рамки, но зато добротность значительно выше. Сравнительные параметры разных антенн приведены в табл. 15.

Таблица 15

Параметры различных антенн (расчетные данные для $\lambda = 600$ *м*)

Параметры	Штыревая антенна высотой 1 *м*	Рамочная антенна площадью 20×20 *см²*	Магнитная антенна с сердечником из феррита с $\mu_0 = 500$, $l = 200$ *мм*, $d = 10$ *мм*
$h_д$	0,5	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Q	50	50	75
Эффективность антенны	0,55	0,34	0,26

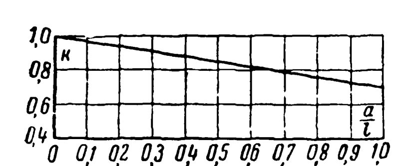
Действующая высота магнитной антенны (в метрах)

$$h_д = \frac{2\pi w S \mu_д}{\lambda} kp \cdot 10^{-4}, \qquad (36)$$

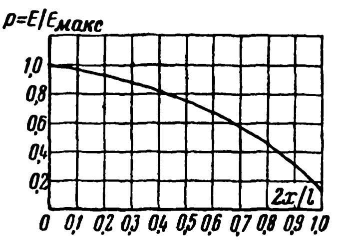
где k — коэффициент, зависящий от отношения длины катушки к длине сердечника (фиг. 47);

$p = \frac{E}{E_{макс}}$ — коэффициент, учитывающий смещение катушки относительно середины сердечника (фиг. 48);

λ — длина волны.



Фиг. 47. Зависимость коэффициента k от отношения длины намотки к длине сердечника.

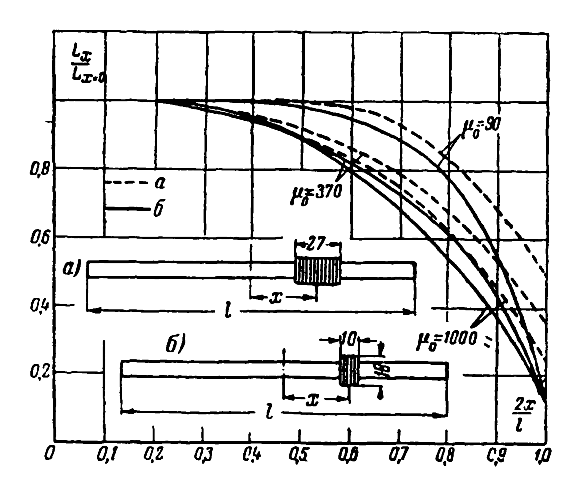


Фиг. 48. Зависимость коэффициента p от расположения катушки на сердечнике.

Эта формула справедлива для однослойной катушки, диаметр которой близок к диаметру сердечника. Как видно из фиг. 48, наибольшую действующую высоту антенны можно получить при расположении катушки в середине сердечника.

Для магнитных антенн в диапазоне длинных и средних волн в качестве материала сердечника рекомендуется использовать ферриты с $\mu_0 = 400 \div 1\,000$ *гс/эрс*, как обеспечивающие хорошую добротность. Для обеспечения большого значения $\mu_д$ отношение длины сердечника к его диаметру должно быть порядка 20—25.

Как уже было сказано, при введении сердечника в катушку ее индуктивность увеличивается в $\mu_{отн}$ раз. Относительная проницаемость сердечника зависит не только от материала сердечника и его размеров, но и от конструкции катушки и ее расположения на сердечнике. Это значит, что, перемещая катушку вдоль сердечника, можно изменять $\mu_{отн}$, а следовательно, и индуктивность в пределах, необходимых для подстройки антенного контура для сопряжения с контуром гетеродина. На фиг. 49



Фиг. 49. Относительное изменение индуктивности катушки в зависимости от ее расположения на сердечнике.

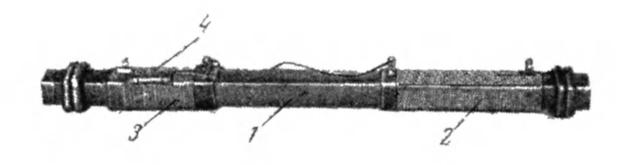
а — для однослойной катушки; *б* — для многослойной катушки.

показано относительное изменение индуктивности катушки от ее положения на сердечнике для однослойной и многослойной намотки при одном и том же числе витков.

В приемниках с диапазонами длинных и средних волн вместо двух отдельных антенн удобней ставить одну комбинированную антенну. На фиг. 50 показана такая антенна от приемника «Дорожный». На концах сердечника сечением 1 *см*² и длиной 200 *мм* расположены две однослойные катушки, намотанные на тонких гильзах из кабельной бумаги проводом ПЭШО 0,15. Длинноволновая катушка намотана виток к витку, а катушка средневолновая с принудительным шагом в 1 *мм*. Добротность обеих катушек вполне достаточна. Иногда даже добротность длинноволновой катушки

понижают, чтобы расширить полосу пропускаемых частот (для этого параллельно катушке подключают шунтирующее сопротивление). При работе на длинных волнах обе катушки соединяются последовательно, а на средних волнах длинноволновая катушка замыкается накоротко.

Магнитная антенна так же, как и рамочная, обладает направленными свойствами. Чтобы эти свойства антенны не ухудшались, она должна быть свободна от так называемого



Фиг. 50. Магнитная антенна приемника „Дорожный".
1 — сердечник из феррита; *2* — средневолновая катушка; *3* — длинноволновая катушка, *4* — шунтирующее сопротивление.

антенного эффекта (действия электрической составляющей поля). Для этого антенна заключается в хорошо проводящий заземленный разрезной экран.

Характеристика направленности магнитной антенны не имеет резкого максимума, а имеет резкий минимум. Поэтому, если нужно отстроиться от мешающей станции, антенну нужно ориентировать по минимуму помехи, а не по максимуму основной станции. Поворот антенны в переносных приемниках осуществляется вращением самого приемника, а в стационарных приемниках — специальной ручкой.

*
* *

Выше были изложены основные свойства и применения ферритов — новых высокочастотных магнитных материалов. Свойства ферритов непрерывно улучшаются. Разработанные в последнее время марганец-цинковые ферриты марки оксифер-М с начальной магнитной проницаемостью 1 000 ÷ 3 000 *гс/эрс* позволяют значительно улучшить параметры катушек индуктивности в диапазоне частот до 500—1 000 *кгц*.

Применяя ферриты, необходимо учитывать их специфические особенности по сравнению с магнитодиэлектриками.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФЕРРИТОВ МАРКИ „ОКСИФЕР“

Марка феррита	Проницаемость, *гс/эрс*		$H_0 = 100$ *эрс*			Тангенс угла потерь при $f = 100$ *кгц*		ТК $\mu_0 \cdot 10^6$	Допустимая рабочая температура, °С	Изменение проницаемости в течение года, %	Маркировочный знак
	начальная	максимальная	Индукция насыщения, *гс*	Остаточная индукция, *гс*	Коэрцитивная сила, *эрс*	$H_\sim \approx 0$	$H_\sim = 10$ *мэрс*				
Оксифер-2000	1 800—2 400	6 000—7 000	2 500	1 200	0,1	0,1	0,2	6 000	70	±1,2	Две белые вертикальные полосы
Оксифер-1000	800—1 200	3 000—3 500	3 200	1 500	0,25	0,05	0,1	4 000	110	±1	Белая вертикальная полоса
Оксифер-600	550—600	1 200—1 400	3 100	1 400	0,4	0,012	0,016	3 500	120	±0,3	Две желтые вертикальные полосы
Оксифер-500	500—550	1 000—1 200	2 800	1 300	0,5	0,01	0,012	3 000	120	±0,3	Желтая вертикальная полоса
Оксифер-400	360—400	750—850	2 300	1 200	0,8	0,006	0,0075	2 000	120	±0,3	Четыре красные вертикальные полосы
Оксифер-200	180—220	280—330	1 800	1 000	1,5	0,0055	0,0062	800	120	±0,3	Две красные вертикальные полосы
Оксифер-И-4	180—220	750—850	4 200	2 000	0,8	0,01	0,011	3 500	250	±1	Черная вертикальная полоса
Оксифер-И-5	135—165	650—750	4 800	2 250	1,2	0,016	0,019	3 500	360	±1	Две черные вертикальные полосы
Оксифер-РЧ-50	45—55	100—150	—	—	—	0,02*	—	2 000	350	—	Две красные точки
Оксифер-РЧ-25	22—28	80—120	—	—	—	0,01*	—	900	350	—	Красная точка
Оксифер-РЧ-15	14—16	35—45	1 800	1 000	15	0,009*	—	500	400	—	Две голубые точки
Оксифер-РЧ-10	9—11	14—17	1 400	400	24	0,0077*	—	200	400	—	Голубая точка

* При $f = 20$ *мгц*.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФЕРРИТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МАРКИ Ф

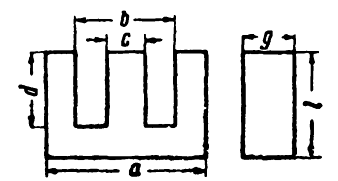
Марка феррита	Начальная проницаемость, *гс/эрс*	Индукция насыщения при $H = 10$ *эрс*, *гс*	Остаточная индукция, *гс*	Коэрцитивная сила, *эрс*	Общий тангенс угла потерь при $f = 100$ *кгц* и $H_{\sim} \approx 0$	Температурный коэффициент начальной проницаемости, $ТК\mu_0 \cdot 10^6$	Допустимая рабочая температура, °C	Изменение проницаемости в течение года, %
Ф-2000	2 000±200	3 000	1 200	0,2	0,04	7 000	90—100	±0,7
$Ф_1$-1000	1 000±100	2 500	1 200	0,3	0,02	5 000	100	±0,5
$Ф_2$-1000	1 000±100	1 700	750	0,35	0,035	2 500	80	±0,5
Ф-600	600±60	3 000	2 000	0,65	0,017	6 000	130	±0,5
Ф-400	400±40	2 500	1 500	1	0,013	3 000	130	±0,5
$Ф_1$-100	100±10	3 800	3 000	2	0,008	4 000	280	±0,75
$Ф_2$-100	100±10	2 500	1 700	3	0,011	2 500	450	±0,5
Ф-40	40±5	1 000	500	4	0,006*	1 000	300	±0,5
Ф-25	25±3	1 100	800	6	0,005**	1 300	500	±0,5
Ф-15	15±2	800	500	9	0,006***	900	500	±0,5

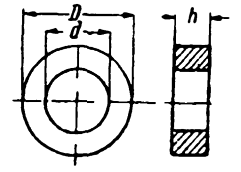
* При $f = 1$ *мгц*
** При $f = 5$ *мгц*.
*** При $f = 20$ *мгц*.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ КОЛЬЦЕВЫХ СЕРДЕЧНИКОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК ФЕРРИТОВ

Марка феррита	*D*, *мм*	*d*, *мм*	*h*, *мм*
Оксифер-2000	13	5	5
Оксифер-1000	18	8	5
Оксифер-600	21	11	5
Оксифер-500	32	18	6
Оксифер-400	39	25	7
Оксифер-200	46	29	8
Оксифер-И-4	58	34	12
Оксифер-И-5	67	42	14
Оксифер-РЧ-15	13,5	5,5	5
Оксифер-РЧ-10	19,5	9,0	5
	23	12	5
	33	20	7





ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ Ш-ОБРАЗНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК ФЕРРИТОВ

Марка феррита	Наименование детали	*a*, *мм*	*b*, *мм*	*c*, *мм*	*d*, *мм*	*l*, *мм*	*g*, *мм*
Оксифер-2000	ОШ-7	30	20	7,2	10,2	15,2	7,3
Оксифер-1000							
Оксифер-600	ОШ-7×2	30	20	7,2	10,2	15,2	14,8
Оксифер-500	ОШ-12	42	30	12	15,2	21,5	15,8
Оксифер-400							
Оксифер-200	ОШ-17	55	38	17	19,2	27,7	22,0
Оксифер-И-4	ОШ-20	65	45	20	22,5	32,5	28,0
Оксифер-И 5							

ЛИТЕРАТУРА

Шольц Н. Н. и Пискарев К. А., Сравнительные электромагнитные характеристики оксидных ферромагнитных и некоторых типов магнитных материалов, Известия АН СССР, серия физическая, т. 16, № 6, 1952.

Рабкин Л. И. и Эпштейн Б. Ш., Некоторые свойства никель-цинковых ферритов, ЖТФ, т. XXIV, 9, 1954.

Цыкин Г. С., Трансформаторы низкой частоты, Связьиздат, 1950.

Шольц Н. Н., Электромагнитные свойства оскидных ферромагнетиков, Известия АН СССР, серия физическая, т. 18, № 4, 1954.

Облезов М. И. Способ плавного изменения индуктивности катушек с ферромагнитным сердечником, авторское свидетельство за № 418366/А — 295.

Цена 1 р. 95 к.